and idea with business
与思想有关

FLYING THE BIG JETS

4TH EDITION

【英】斯坦利·斯图尔特（Stanley Stewart）
约翰·爱德华兹（John Edwards）◎著　吴土星 黄德先 张永忠 ◎译

杨元元 ◎审校

冲上云霄

大型喷气机的飞行



原书第4版

飞行员、飞机爱好者必读

国内首部揭秘大型喷气机内部构造、飞行原理的最权威著作

浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

FLYING THE BIG JETS

4TH EDITION

【英】斯坦利·斯图尔特（Stanley Stewart）
约翰·爱德华兹（John Edwards）◎著　吴土星 黄德先 张永忠 ◎译

杨元元 ◎审校

冲上云霄

大型喷气机的飞行



原书第4版

飞行员、飞机爱好者必读

国内首部揭秘大型喷气机内部构造、飞行原理的最权威著作

浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

FLYING THE BIG JETS

4TH EDITION

All You Wanted to Know about the Jumbos but Couldn't Find a Pilot to Ask

冲上云霄

大型喷气机的飞行

【英】斯坦利·斯图尔特（Stanley Stewart）
约翰·爱德华兹（John Edwards） ◎著　吴土单　黄德先　张永忠 ◎译

杨元元 ◎审校

原书第4版

浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

谨以此书献给我病逝的妹妹多萝西，她在病中为本书的第1版做了大量案头工作。

还要感谢早期为本书的出版慷慨给予帮助的人们。在第4版推出之时，也要对英国航空公司波音777训练部的约翰·爱德华兹机长表达深深的谢意。约翰的帮助、知识与热情都是无价的，没有他，本书的第4版也不可能出版。再次对约翰致以十二万分的感谢。

版权信息

本书纸版由浙江人民出版社于2014年12月出版
作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）
版权所有·侵权必究

书名：冲上云霄：大型喷气机的飞行
著者：（英）斯坦利·斯图尔特 约翰·爱德华兹
字数：286000
电子书定价：41.99美元

Flying the Big Jets: All You Wanted to Know about the Jumbos but Couldn't Find a Pilot to Ask by Stanley Stewart
Copyright © 2002 by Stanley Stewart

目录

推荐序 认识飞机，了解飞行

引 言 揭开飞行之谜

第一部分 飞机内在与飞行细节

01 飞行基本原理

02 喷气发动机的工作循环

03 无线电与雷达

04 导航简史与导航图

05 飞行领航

06 飞行仪表

07 波音777 驾驶舱

08 气象条件

09 空中交通管制

10 飞行机组

第二部分 波音777-200飞行实例

11 英航213：从伦敦到波士顿

附录1 波音777相关参数

附录2 飞行专用术语

推荐序

认识飞机，了解飞行

编辑请我写一篇推荐序，以便读者更好地了解《冲上云霄：大型喷气机的飞行》这本书。在我看来,本书引言“揭开飞行之谜”已经写得十分精彩，翻译的语言也通俗易懂，活灵活现，引人入胜。作为一名波音777的老飞行员，作者的描述深深地打动了我的心扉。

回想起自己在航班飞行时，有许多旅客，尤其是孩子们，对飞机上的每一种设备都感到好奇和新鲜，路过驾驶舱时，如果门开着（现在这样的机会可以说是少而又少），他们会探头探脑，眼神中充满了对飞机的好奇和了解飞行知识的渴望。不过那时我们往往都在进行紧张的飞行前准备，无暇顾及。随着中国经济的发展，乘坐飞机旅行的人越来越多，喜欢飞机、热爱飞行并最终能如愿以偿的人也越来越多，我们翻译出版这本书的目的也就在于此。

飞机发明至今只有110年，商业性飞行的出现真正始于20世纪50年代，第二次世界大战结束后不久，至今不过六十余年。而在科技飞速发展的今天，全球每天都有超过1 000万人乘坐飞机旅行。中国作为全世界民用航空第二大国，各航空公司每天承运的旅客约有百万人次。最新问世的空客A380和波音787，每位乘客每百千米的耗油量已下降至3.0升以下，远远低于小型汽车的耗油水平。而且，航空界在节油、环保等

各方面仍在持续努力。

大多数普通乘客在乘坐飞机时，几乎都想了解一下飞机的内在。驾驶舱内五光十色的仪表、长短不一的把手都有什么用处？飞行员需要做些什么？他们如何应对紧急状况，确保安全？对于这些问题，本书都会一一作答。书中介绍的伦敦至波士顿航班的飞行，是基于英国航空公司的飞行程序，叙述得极为详尽。其中有些程序与中国民航有所不同，对专业人士取长补短也大有益处。

本书谈到的波音777，是目前世界上最大的双发动机宽体客机。今天,在全球每天有超过1 000架次的波音777飞机在各地运行。20世纪90年代，我在南方航空公司任副总飞行师、总飞行师，当时南方航空是波音777飞机的首批用户之一。依照波音公司“携手努力”的理念，我有幸参加了波音777飞机的设计工作，多次参加会议、研讨。印象最深的是，当时波音公司已经开始考虑在首款200型飞机的基础上设计制造波音777–300型飞机，将机身加长10米多一点。这就带来一个问题，飞机的前轮至主轮的距离超过了31米，再加上飞行员的驾驶舱座椅还在前轮前面4米，这无疑给飞行员的地面滑行，尤其是在较窄的滑行道上大角度转弯以及在跑道上调头带来挑战。

当时，波音公司制造了一架1:1尺寸的模型（无机翼和机身），采用三种办法在地面滑行。一是传统做法，即凭目测判断操纵前轮转弯；二是在传统的基础上增加对前轮、两组主轮由摄像实时在驾驶舱中显示（GMCS）；三是革命性的改革，即使用液压驱动滑行，新设计的滑行手柄前推飞机向前滑行，还可后拉飞机后退。我们在波音777、747工厂的机场使用这架飞机模型反复进行滑行试验。记得有一次滑入跑道时，空中的一架小飞机飞行员向塔台报告“有个怪物要进入跑道……”。验证的结果仍是传统的做法利大于弊。第三种办法不错，但大大增加了飞机系统的复杂性。第二种办法要求驾驶员既看座舱的荧光屏，又看外面，

反而容易顾此失彼。经过反复比较衡量后，波音公司最终采用的是第二种办法，但在手册中详细规定了以目视判断为主的原则。

那时南方航空公司引进波音777飞机是想开通广州至洛杉矶的航线，其实在当时的条件下，双发飞机飞越太平洋飞行还有不小的挑战，我们在飞机的前轮上方喷涂了“越太平洋飞行”的中英文字标，以示决心。功夫不负有心人，1997年7月20日，首航成功，这里既有南航的努力，也有波音777的功劳。

《冲上云霄：大型喷气机的飞行》自首次出版以来，已经再版了三次。本书作者是飞行员，具备深厚的飞行理论基础和丰富的飞行经验。更为难得的是，作者文笔细腻流畅，深入浅出，以波音777为蓝本，把僵硬枯燥的飞行原理转变成了易懂有趣的飞行现象，把航空发展的历史不露声色地融入到许多内容之中，让读者在轻松的阅读中获得航空知识和飞行体验。本书内容介于科普读物和专业书籍之间，非常适合那些向往航空、热爱航空，尤其是对大型民用飞机感兴趣的读者阅读。

本书的翻译工作主要由中国民航飞行学院继续教育学院院长、英语培训部主任吴土星教授完成，黄德先、张永忠两位教授也共同参与了翻译工作。由于知识领域和语言水平的限制，书中难免有不少不当之处，望读者在阅读时指正。

杨元元

引言

揭开飞行之谜

飞行方面的著述很多，从历史上人类早期飞行尝试的传说到太空旅行的科幻小说应有尽有。两次世界大战激发了很多有才华的航空人的创作，飞行原理方面的指导手册层出不穷，飞行方面的小说也很多，包括飞艇灾难、协和飞机戏剧般的命运、航空公司飞行员的故事，以及航空领域中的各种事件。那为什么我还要写一本飞行方面的书？很简单，需求存在。已有的资料无法满足公众对飞行的好奇，本书所提供的内容就是为了填补这个空缺。“大飞机究竟是怎么飞的？”这是每个人都会问起的，也是本书试图回答的问题。

坐过飞机的人很多，没有坐过飞机的人也从电视、电影中对航空界有一些了解。例如，对从巴黎到纽约的乘客而言，他们虽然对飞行过程比较了解，但对机组的一些基本飞行程序却不过一知半解。

机组在起飞前约一个小时到达机场，检查飞行文件，查看天气状况，机长决定所需的油量。机组登机，开始在驾驶舱做起飞前检查。检查完成后，乘客登机，详细检查离场程序后，启动发动机，用无线电联系各类管制员，按照他们的指令，飞机滑出、起飞，然后入航，前往目的地。

飞行途中，飞机沿着预定的航迹，从一个航空无线电管制中心飞到

另一个管制中心。快到目的地时，机组检查进场程序，再次联络各类管制员，飞机开始下降程序，完成进近，下降到着陆高度，完成着陆，滑到候机楼。接着关断发动机，完成最后的检查。机组完成长途飞行后，可以下班休息；如果飞的是短途，他们很可能继续前往另一个目的地，再次开始飞行前检查，重复整个程序。

当然，所有这些看上去并不复杂，但也差不多包括了飞机从甲地飞到乙地且可能继续飞往丙地的基本程序。然而，表面上似乎相当简单的程序，实际上却是非常复杂的操作。飞行机组需要大量的训练、丰富的知识、精湛的技术，才可能在恶劣的环境中安全完成任务。众所周知，他们的任何失误都不可原谅。尽管大多数的飞行都是正常的飞行，在众多的生命面临危险的情况下，保持较高的警觉与警惕就成为机组的第二天性，因此，墨菲定律（Murphy’s Law）[1]更适用于对飞机的操作。

墨菲定律是这样说的：（1）任何事情都不像表面看上去那么简单；（2）所有的事都会比你预计的时间长；（3）任何可能出错的事，终将会出错，还是在最不合适的时候。航空领域发生的事故很少，很大程度上是因为所有航空人都尊重这三条定律。

过去几年里，公众对大型喷气飞机产生了浓厚的兴趣。今天，选择航空旅行的公众尤其想了解围绕飞机所发生的事情。乘坐飞机时获得的信息极少，在机场或电影中看到的有关飞机的信息也很少，这足以吊起公众进一步了解飞机的胃口。人们想了解飞机的内在，想知道飞行的基本细节。任何航空公司的飞行员都遇到过这样的情况，没有驾驶过飞机的朋友若是得知了他的职业，就会抛出各种问题，对他进行狂轰滥炸。多久换一次轮胎？飞行员一直飞同一条航线吗？他是否不止飞一个机型？他同时要看所有的仪表吗？还有成百上千类似的问题。

对有些人而言，航空领域充满魔力与神秘，甚至出乎意料。飞行过

程中发生的事超出他们的想象，即使那些机敏的人也摸不着头脑。在飞长航线时，比如从欧洲到澳大利亚，乘客看到第一航段的飞行机组，而近24小时后他们在悉尼下飞机话别的又是另一班人马，这也没有什么不寻常的。乘客可能乘坐同一架飞机完成旅行，而机组很可能中途下飞机休息。

然而公正地看，对粗心大意的人来说，飞行这一话题中充满了陷阱，因为许多想象的和看到的往往不是事实。看看海鹦，硕大的鸟嘴，怪模怪样的身子，人们可以轻而易举地想到两个事实——行走相当困难，不可能飞行。当然，没有人把这些告诉海鹦！尽管海鹦很笨拙，但它确实能飞。飞机尽管非常复杂，但终究还是一堆机械与电子设备，就像缝纫机、火车一样，同样需要精心照料、加油润滑与维护。比如，航空公司并非都用新轮胎换掉旧轮胎，就像家用汽车一样，只要可能也使用翻新轮胎。这一事实让初次听到的人感到惊诧！大型喷气飞机也有我们常见的风挡玻璃雨刮器和清洗器！

飞行机组也是如此，总体上他们也是普通人，简简单单，就像其他任何人一样，做着自己的工作，也有各种各样的兴趣爱好，不过，他们可能有一些特殊性。大众并不了解他们所遭遇的难处，比如，他们脚崴了，外科医生可能简单处理一下很快就会放行，却并不了解飞机的基本操纵面——方向舵，是由脚蹬来控制，刹车则由脚尖施加压力来操作。脚的力量稍微弱一点或一只脚动作不到位都可能带来灾难性的后果。出于对这份工作特殊性的考虑，大部分的航空公司都雇用自己专门的医务人员。

本书中，我们尽可能回答更多的问题，提供更多与飞行员的训练、知识与技能相关的信息，为读者提供飞机内在的数据，让本书读起来生动有趣，且有教益。《冲上云霄：大型喷气机的飞行》一书不想讲故事，而是以清楚简单的方式陈述人们想知道的信息。尽管很多材料都是

关于技术的，但本书不是技术手册，仅仅是写给那些对大型喷气飞机感兴趣的外行人看的，是航线飞行的基本介绍。本书能够为所有具备基本科学素养的人所理解，并根据需要提供了插图和图片。

本书以飞行员的眼光，在“飞机内在与飞行细节”部分提供了很多的详细内容，让读者在第二部分能够坐在飞行员的座位上来一次想象之旅。本书聚焦大型飞机而省略了包罗万象的一般的航空信息，但对重要的内容并没有一笔带过。理解大型喷气飞机需要一定的基本航空知识，本书为读者提供的基本知识很容易让他们跨越这一步。由于本书主题的特性，内容重复不可避免，飞行本身就涉及各种不同的相关因素，但重复的细节会尽可能减少。根据需要，括号内注明了可参阅的其他章节。

航空语言充满了缩略词，有必要向读者做些介绍，如ND（导航显示器）、PFD（主飞行显示器）、EICAS（发动机指示与机组警告系统）等。过多使用不熟悉的缩略词让人生厌，本书会尽可能地避免。书后提供了飞行专用术语表（参见附录2）。

希望本书至少能满足部分读者想获知更多信息的愿望，当然它不可能让所有人都满意。现代飞机极其复杂，难以让飞行员同时飞几种机型，航空公司的飞行员大多数都只飞一种机型，如波音777。大型客机的构造与大小差异很大，在一种机型上的正常操作，在另一种机型上很可能带来危险。同样，飞行员也分为全球长途飞行与本土短途飞行，对某一类飞行员来说正确的操作，对另一类飞行员则未必正确。同时，即使同一航线上飞同一机型，航空公司与竞争对手有时也采取不同的做法。

现在波音777还在飞行，新的双发波音777在世界各地的天空都留下了优雅飞行的身姿，本书第4版展示了该机型的一些飞机内在。波音777是世界最大的双发飞机。波音777–300是速度最快的宽体双发飞

机。波音777–300X是飞行距离最远的飞机，其翼展[2]与747–400相同。波音777是波音公司生产的第一代电传操纵飞机，其300X型最新的发动机产生的总推力不低于747–400型4台发动机的推力。这是一部让人印象深刻的飞行机器。

书中所提供的飞机内在与数据主要来自波音大型喷气飞机，以及世界范围内的操作程序。本书尽可能介绍全面，但如前所述，难免有一些省略与不连贯之处。机组并非总是按照所说的来操作，所有地方的飞行员并非以同样的方式生活。尽管有如上申明，飞行员若被邀请赴宴，他应该带上几本《冲上云霄：大型喷气机的飞行》提前分发给朋友，这能保证他有充裕的时间享受一顿美餐。

[1]墨菲定律是美国爱德华兹空军基地的上尉工程师爱德华·墨菲（Edward Murphy）作出的著名论断。它和“帕金森定律”、“彼德原理”并称为20世纪西方文化三大发现。——译者注

[2] 翼展指固定翼飞机左右翼梢最外端点之间的距离。根据国际民航组织机场设计标准，目前最大翼展为80米。——译者注

FLYING THE BIG JETS

第一部分

飞机内在与飞行细节

01

飞行基本原理

水平直线飞行的飞机受4个力的影响（见图1—1），当这4个力平衡时，即升力等于重力，推力等于阻力时，飞机就平衡飞行。

- 升力是由机翼产生的向上的力，作用于一个中心点，即压力中心。
- 重力由千克（kg）或磅（lb）来表示，作用于重心。
- 推力是发动机产生的力，通常表示为千牛顿（kN）[1]或磅，推动飞机在空气中前行，作用于同向来的阻力。
- 阻力是空气阻止飞机运动的力。

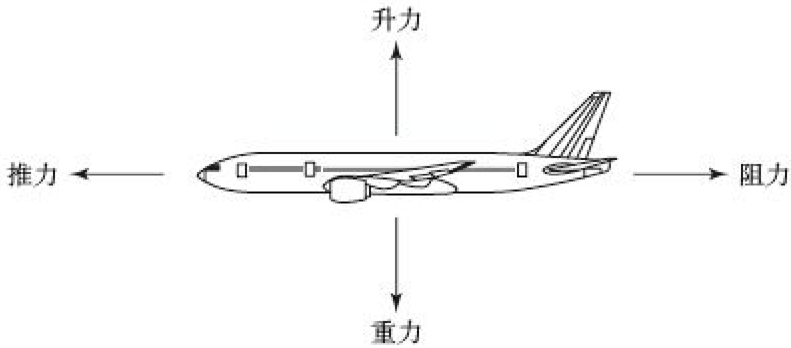


图1—1 作用于飞机的4个力

升 力

如果司机在疾驶的车辆中将手伸出窗外，手伸直朝向气流方向，气流流过手的表面就会产生一个抬升的力，并将手向后推（见图1—2）。这个向上的分力叫升力，向后的分力叫阻力。机翼的形状要比放平的手精确得多，其效率也大得多，不过产生升力的方式相同。机翼以一定的角度安装在机身上，飞行时与气流的方向形成一个相对位置。空气流过凸起的上表面，气流上升并沿着机翼弧线流动，距离加长，速度加快，这就在上表面形成低压区，向上拉升机翼。气流产生的升力使机翼的下表面压力增加，向上抬升机翼，但上表面由于压力减小所产生的升力远大于下表面所产生的升力。

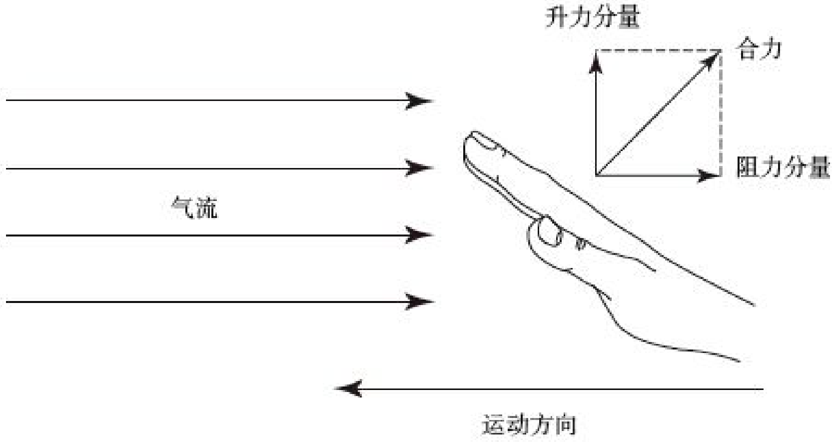


图1—2 升力与阻力

机翼上表面的低压区不是真空区，只是相对于周围空气压力减小，称作负压。同样，机翼下表面的高压区相对于周围空气压力增加，称为正压。飞机的压力模式分布（见图1—3）清楚表明，负压在抬升过程中起到了更大的作用。为更准确地描述升力，可以这样认为，机翼上下表面的低压与高压区一起在机翼后缘形成下冲气流，机翼受到升力向上与向后的作用。简单说来，飞机好像是由机翼上表面的低压将其吸进空气中，这种说法并不荒谬。

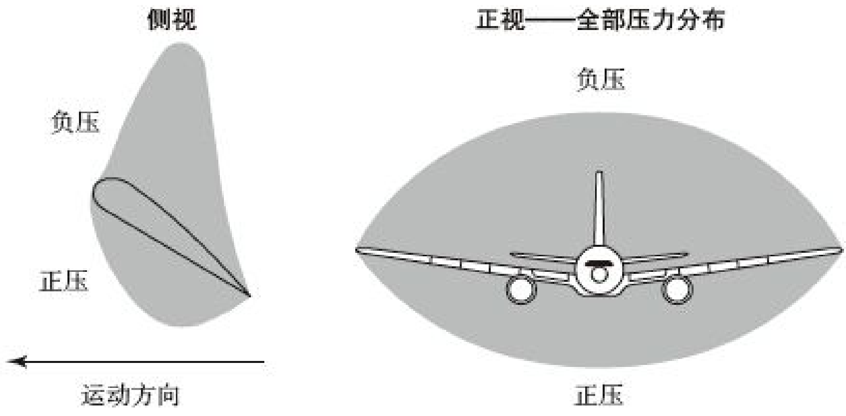


图1—3 飞机周围的压力模式分布

升力受到很多因素的影响。空气密度影响升力：密度越大，升力越大。流过机翼的空速，即飞机的真空速（true airspeed，TAS）也影响升力：速度越快，升力越大。机翼相对于气流的角度叫迎角（见图1—4），也会影响升力：迎角越大，升力越大。机翼固定在机身不动，向上或向下俯仰机头可改变迎角大小，即改变飞机的姿态。要保持升力不变，如水平飞行时，改变真空速需要调整飞机姿态；空速增加，需要降

低机头，空速降低，需要抬高机头。机翼面积也影响升力：面积越大，升力越大。飞机越大越重，要产生足够的升力需要的翼展和机翼面积就越大。如今的大飞机都有着巨型的机翼，波音777–300X翼展长达64.9米，与波音747–400的翼展相同。

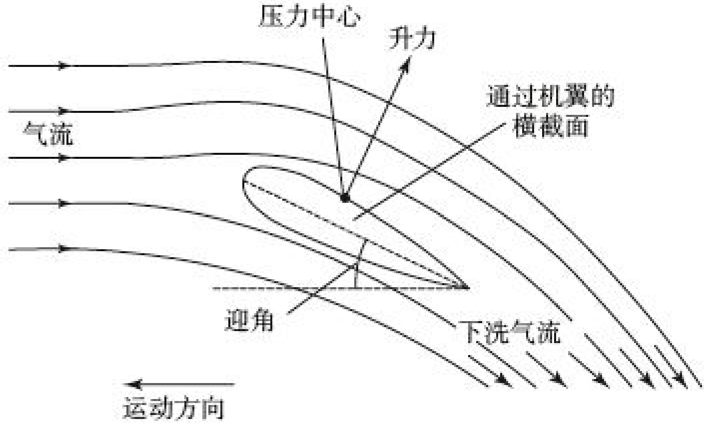


图1—4 迎角

现代喷气飞机使用较大的后掠翼（波音777后掠角达32度），飞机高速巡航时，可以延迟气流达到音速时出现冲击波。低速飞行时，机翼产生升力的能力较差。这就需要前缘和后缘襟翼等增升装置，打开增升装置，机翼面积增加，机翼的弧高增加（见图1—5）。襟翼完全打开，机翼面积增加20%，升力增加超过80%。襟翼可增加升力，减慢速度，同时阻力也增加，让飞机慢下来。机翼下方的独木舟型整流罩把襟翼运行时的轨道与传动装置包裹起来。

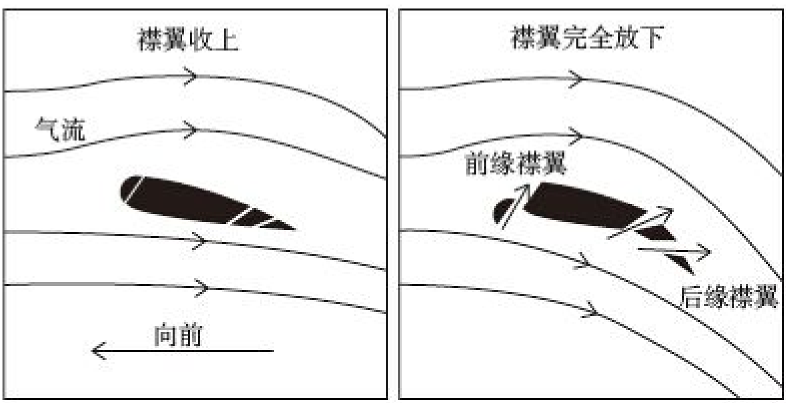


图1—5 襟翼对机翼表面区域和弧度的影响

起飞时要增加升力，根据不同情况使用5度或15度襟翼，由此增加的升力比产生的阻力要大。正常重量运行时，不可能无襟翼起飞。着陆

时，正常情况下选用30度襟翼，系统不正常和道面污染[2]时使用20度襟翼。

大型喷气飞机满载荷长途飞行需要50~60秒较长的起飞滑跑距离才能离陆。达到要求的起飞速度时，飞行员拉升机头（即起飞抬前轮）到预计的俯仰角，也就增大了与气流的迎角，升力增加，飞机爬升。大型喷气飞机以最大起飞重量起飞，要求速度达到大约165节（305千米/小时），通常大型机场跑道长度达到约3 500米[3]才能满足所需的起飞距离。当然，并非所有的飞行都以最大重量起飞，重量减少，所需的升力也少，飞机所需的跑道滑跑距离也较短。



放下的前缘缝翼和襟翼



光洁机翼



20 度襟翼

重 量

飞机的重量通常用千克或磅来表示，如今的大型飞机重量太大，用几十万的重量单位来表示对很多人而言难明其义，通常使用较大的单位来表示重量。1吨（或公吨）等于1 000千克，等于2 200磅。1长吨[4]等于2 240磅。1长吨约等于1吨，只差40磅。使用公制、英制，“吨”还是“长吨”，没有什么差别，为简化起见，一律使用“吨”。举个例子，波音777–200的最大起飞重量为297 600千克或656　000磅，用近300吨来表示就很清楚地说明了重量的大小。波音777–300X最大起飞重量是340吨，747–400是397吨。

飞机载荷

飞机的结构空重加上机载设备重量、机组成员及其行李的重量，合在一起看作是飞机的使用空重。它再加上乘客（男性每个人以78千克/170磅、女性以68千克/150磅、儿童以43千克/95磅、婴儿以10千克/22磅计算，包括手提行李及随身物品的重量）和货物（包括乘客的行李）的重量就是业载。使用空重加上业载，不包括燃油的重量，称为无油重量。无油重量加上燃油重量，就获得最后的起飞重量（见图1—6）。飞机飞行任何时刻的总重量称为飞机在空中总重量（all-up weight，AUW）。

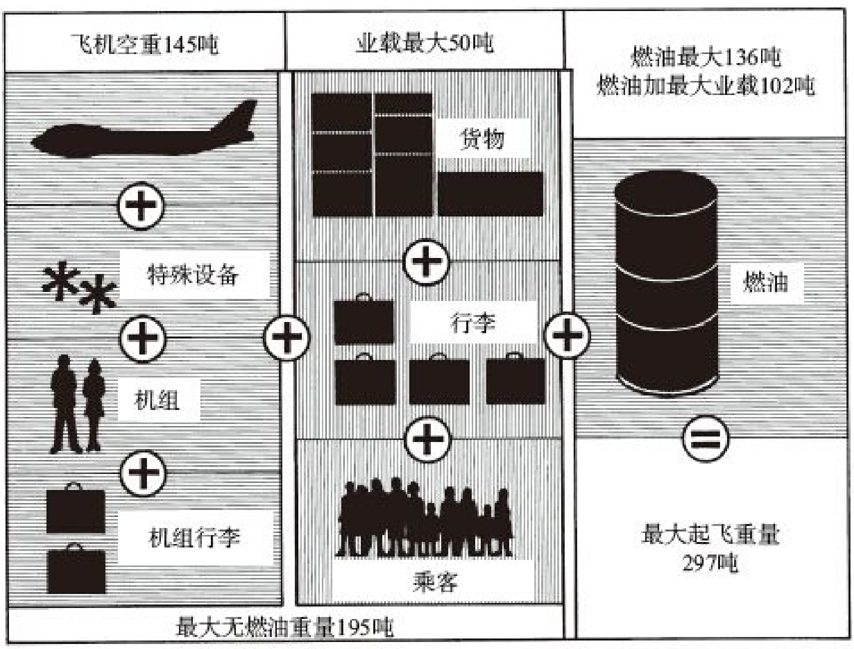


图1—6 起飞重量——波音777–200系列

波音777–200系列飞机使用空重约144吨。它的最大结构起飞重量是297.5吨，其中最大业载加上可携带的燃油量可达到153.5吨，超过了波音777–200自身的结构空重！最大的燃油重量取决于燃油的自重与油

箱的最大容积，约为137.5吨。最大的载客量取决于最大的座位安装数。波音777–200可安装300～375个座位，根据不同座位布局，其加长型波音777–300座位数可达370～450个。

按7个小时的飞行时间来计算，波音777–200的平均重量为：使用空重144吨，业载30～40吨，燃油50～55吨（用掉约45吨，余下为备用油），起飞重量为220～240吨。

重量与平衡

重量在飞机上的分布非常重要：装载不正确会导致飞机要么机头过重，要么机尾过重，操纵面无法纠正。有效载荷及其分布需要预先精确地计划。大部分货物（旅客行李在办理登机手续时就量过）预先装在货盘上，设计时就考虑到了货盘与货舱的固定问题。记录下每一个货盘的重量，并准确地安排其位置。使用专门的装载车辆把货盘升到货舱门的高度，然后用滚轴把货物从升高的平台上滑到货舱预先确定的位置。机长决定所需燃油的重量，将燃油重量按照燃油的比重转换为体积，然后以升或加仑为单位，把燃油加进机翼或机腹的油箱中。

乘客的重量与座位的分配在办理登机手续时就输入计算机，同时货物的分布、最终装载的燃油重量等信息也输进计算机。计算机算出飞机的重心，检查是否在限制范围内。飞机设计时就考虑了重心的移动，可以使用不同的重量起飞，重量的分布也可变化。飞行过程中，燃油消耗会改变燃油的重量分布，导致重心的移动。因此，计算机也要计算出重心在整个飞行中是否依然保持在适当范围内。所有这些信息都记录在舱单上，装载完成后离场前要把它交给机长检查签字。



设置襟翼30度着陆

推 力

静推力是发动机在飞机静止不动时用最大起飞功率所产生的推力。由于喷气发动机的性能与吸入空气的密度成正比，我们假定飞机在海平面以标准大气温度15℃、标准气压1 013.2hP为准。波音777–200系列配备的通用电气GE90–94B发动机，每一台能产生416.5kN或93 800lb的静推力。波音777–300X配备的通用电气GE90–115Bs发动机，每一台能产生466.5kN或114 800lb的静推力，全动力起飞条件下两台发动机产生高达933kN或229 600lb的静推力。

阻力

阻力有两大类，一是飞机形状与蒙皮产生的翼型阻力，一是产生升力过程中形成的诱导阻力。

翼型阻力

飞机的形状所产生的阻力，是因为平滑的气流被飞机的形状所分离，实际上也叫形状阻力。飞机的结构设计为流线型，是为了把形状阻力减少到最小。

飞机蒙皮与气流摩擦也会产生阻力，叫蒙皮摩擦阻力。快速经过的气流与飞机表面接触会在飞机表面形成一层慢速气流。（以河水为例，河流中间流速快于河两岸，也是这个原因。）慢速气流所形成的附面层的厚度取决于气流流经表面的类型。精心打磨过的飞机表面产生的附面层极薄，可以把蒙皮摩擦减少到最小。

翼型阻力是形状阻力与蒙皮摩擦一起形成的，与飞机的速度有关，飞机速度提高时翼型阻力明显增大——飞机速度翻倍，翼型阻力翻4倍。（骑自行车的人都知道，强逆风与无风条件下骑车，情况很不同。）

诱导阻力

诱导阻力是产生升力的直接结果，由机翼后缘上下层气流交汇形成。机翼上表面的气流向内流向翼根上方的最大低压区，机翼下方的气流向外流向翼根下方的最大高压区。这两股气流在机翼的后缘以一定角度交汇，在每一个翼尖形成旋转气流，称为翼尖涡流（见图1—7）。这些翼尖涡流沿翼根方向旋转，在大型飞机尾流中形成强度很大的乱流。诱导阻力对速度的影响与翼型阻力完全不同，气流速度增加，诱导阻力实际上减小。翼尖涡流在起飞与着陆的低速时更加明显，设定着陆襟翼的最后进近着陆阶段最为明显。下雨天可以清楚看见飞机着陆时在空中飘飞的水汽。

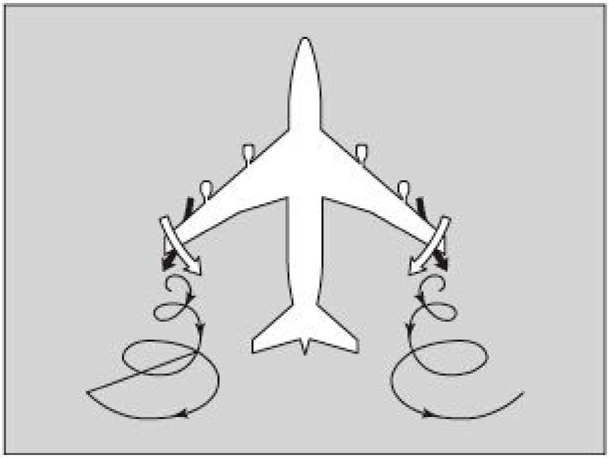


图1—7 翼尖涡流



在正着陆的飞机上能清楚地看见机翼后缘的下洗气流和翼尖涡流

总阻力

如前所述，翼型阻力随气流速度提高而增加，诱导阻力随气流速度降低而增加。任何时候总阻力都包括翼型阻力与诱导阻力。这两种阻力之和所构成的总阻力与速度的关系绘成总阻力曲线，见图1—8。这个图就是总阻力曲线，所有的飞行员都很熟悉。

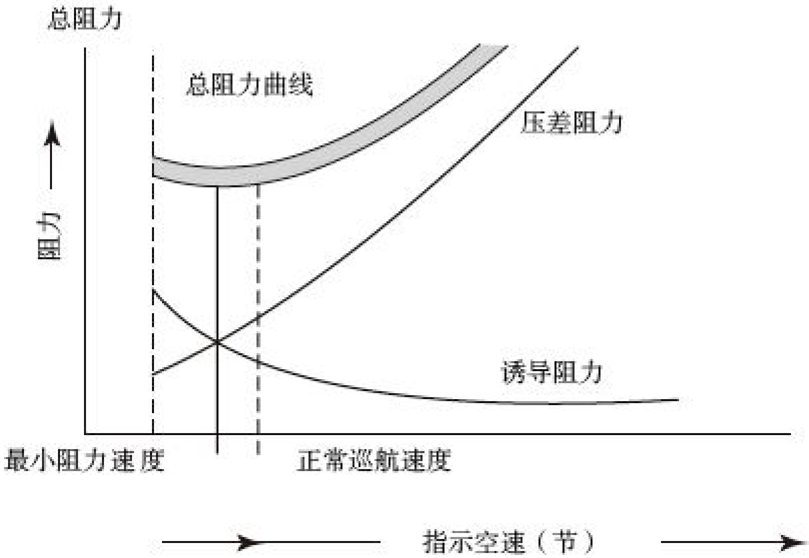


图1—8 总阻力曲线

总阻力曲线图中阻力最小的点所对应的速度，就是翼型阻力与诱导阻力相等的时候。不可思议的是，在这一点时，速度无论是提高还是降低，阻力都会增加。最小阻力时，只要速度降低几节，飞机就会进入“错误”的阻力曲线一边，速度减小，阻力就快速增加，这时就需要更大的推力来增加飞机的速度。正常情况下，巡航速度大于最小阻力对应的速度，使飞机保持在阻力曲线“正确”的一边，确保安全操作的边际。

失 速

飞机速度减慢，要保持足够的升力，拉升机头来增加机翼的迎角，诱导阻力也随之增加。如果飞机的速度太低，机头向上太多，迎角达到临界点，机翼上的平稳气流从上表面分离产生乱流（见图1—9）。平稳的气流分离后，所有的升力消失了，湍流尾流形成最大的阻力，这种情形叫失速。机翼升力消失，机头向下，飞机急速下降，增速后又进入小俯仰角姿态。失速开始时，湍流尾流导致飞机抖振。前推驾驶盘迫使飞机俯冲可以改出失速，同时使用全推力直至飞行速度再次恢复。然后把飞机拉出俯冲改为水平直线飞行。

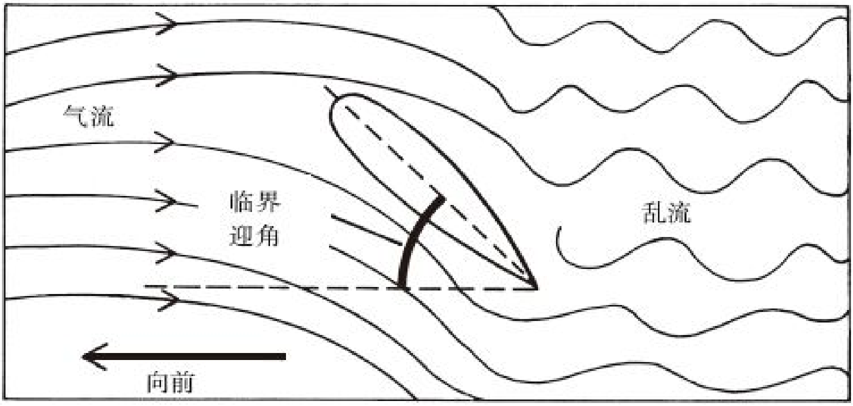


图1—9 失速——临界迎角

显而易见，大型喷气飞机失速是非常危险的，飞行员的训练包括失速的识别和改出，在失速实际发生之前提前识别失速状态，并尽早改出。失速警告设备包括“振杆器”，出现失速状况初期驾驶盘会抖动，“自动推杆器”在失速出现后会猛向前推驾驶盘。波音777–200在最大着陆重量208.6吨时的失速速度，光洁外形（无襟翼或起落架没有放出）为152节指示空速（281千米/小时），襟翼全放出、起落架放下时为107节指示空速（197千米/小时）。振杆器启动速度分别为167节与114节。

翼梢小翼

翼展超过65米会增加飞机在机场地面滑行的难度，波音747–400引进翼梢小翼，来弥补所需的额外的升力，又能在停机坪与机库中保持足够的间隔与安全距离。空客A340–500/600也因同样的原因引进小翼。小翼的设计可以提升巡航性能，产生更大的升力，减少阻力，同时保持较好的低速操作性能。与标准机翼相比，延长翼尖与小翼能够减少燃油消耗大约3%，正因为如此，一些翼展较小的飞机也采取了这种设计。加长型波音777–200X/300X翼展长达64.9米，最小化对原型机的改动，没有吸收翼梢小翼的设计。实际上，波音777使用的是亚音速商用飞机中气动效率最高的机翼形状。因此，波音777要比同类型的飞机爬升更快、巡航更高、速度更快，在高温、高海拔机场，能够允许乘客满员载量。[5]

飞行中的平衡与稳定

平衡性

想象一下，在儿童房的天花板上用一根线挂着一架模型飞机。把线拴在飞机重心位置时，飞机就平衡了；把线拴在飞机重心后面，机头就

朝下；拴在重心的前面，机头朝上。类似地，如果拴线的位置固定，在模型飞机的任何一段稍微增加一点重量就把飞机的重心移动了。

现在想象一架水平直线飞行的飞机，以与用线悬挂的模型飞机相似的方式，由上升的升力作用于压力中心而悬浮在空中。在空中，压力中心就像一个一个中心点，类似于跷跷板的中心，要维持飞机的平稳飞行，就要求重力与升力作用在同一条直线上。要在整个飞行过程中保持飞机的平衡就像在刀口上保持模型飞机平衡一样不切实际。由于起飞与着陆使用襟翼会移动压力中心，巡航燃油消耗会后移重心，升力与重力很少作用在同一条直线上。飞行中，会首先使用中央与机翼内侧的主燃油箱中的燃油，最后使用翼尖油箱中的燃油，由于是后掠翼，重心就会很靠后。增加可移动的水平尾翼可以克服这个问题，它起到稳定的作用；整个水平尾翼的设计可以改变它与气流的角度直到正确位置，从而矫正任何的不平衡。（不要与水平尾翼的升降舵的运动混淆在一起，稍后会讲。）可变换角度的水平尾翼更合适的名称是水平安定面。

重心在压力中心之后，飞机机尾过重，就需要更大的力来抵消机尾过重的影响，从而使飞行更加平稳。这就需要通过液压机械移动整个水平尾翼，增加安定面的迎角来实现。水平尾翼升力增加，会抵消机尾过重的状况。同样，重心在压力中心之前，飞机机头过重，液压机械移动水平尾翼，减小安定面的迎角从而产生负升力，其作用向下，再一次抵消飞机重量的移位，并使其保持平衡。使用液压移动安定面的平衡过程就叫配平[6]。配平飞机时，飞行员可通过驾驶盘上的压力感觉到失去平衡的力。操作驾驶盘上的电源开关可启动液压机械移动安定面。飞机配平后，驾驶盘上失去平衡的压力消失，此时飞机就平衡了，不用人工操作也能继续保持稳定的飞行状态。

起飞与着陆时，飞行条件不断地变化，操纵飞机的飞行员要连续地配平飞机。接通自动驾驶仪后，如正常巡航时，飞机自动配平。离场前，计算机根据起飞后的重量与载荷分布，计算出平衡飞机所需的安定面设定值。起飞前地面检查准备时，就在配平刻度盘上设定好相应的安定面设定值。

稳定性

物体位移后再回到原来的位置，物体就是稳定的，如果不能回来，就不稳定。飞机设计出来就具有一定程度的稳定性，在受到阵风的干扰离开原来的飞行路线时，无需移动飞行操纵面就能回到最初的稳定飞行状况。大型旅客运输机对稳定性要求很高，飞机的俯仰、滚转、偏转三种运动所具有的内在稳定性是基本的空气动力与结构设计的特征。

飞机自身的飞行稳定性

每一种运动可以画一个简图，把飞机的压力中心想象成飞机在各个方向运动的支点（见图1—10）。

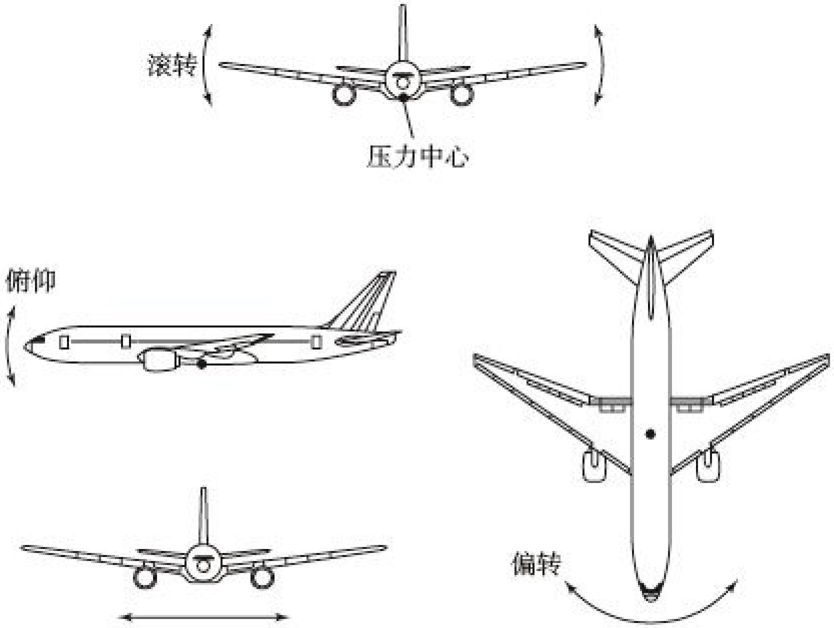


图1—10 压力中心

俯仰运动的稳定是水平尾翼的作用，就像导弹的固定翼或飞镖的尾翼。（不要与为保持平衡飞行通过运动安定面来配平相混淆。）阵风把机头推向上，两个机翼与水平尾翼的迎角都增加。水平尾翼远离压力中心，作用距离较长，所增加的升力足以拉高机尾，使飞机回到水平直线飞行。阵风使机头俯仰向下，会出现相反的情况（见图1—11）。

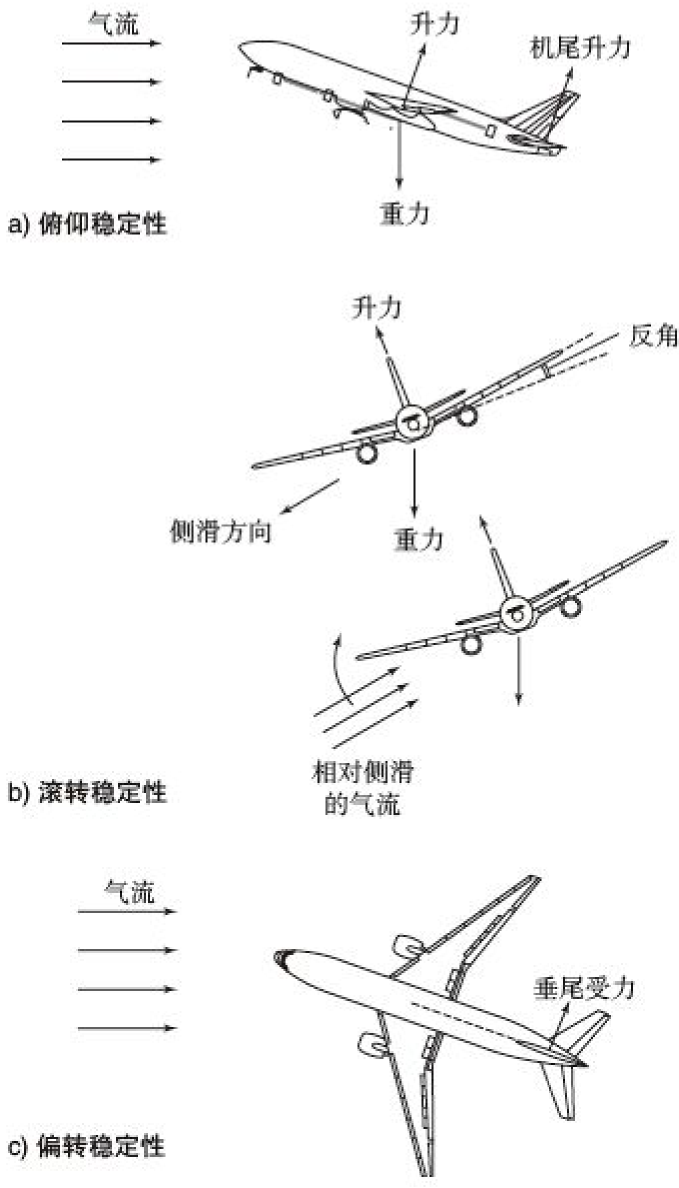


图1—11 固有的飞行稳定性

机翼的反角[7]结构使飞机具有滚转稳定性，每一个机翼都与水平面成小夹角（7度）。如果乱流导致飞机滚转，飞机向一边形成坡度，产生侧滑[8]。受上反角效应的影响，飞机较低侧的机翼下的空气阻力把机翼向上推，一侧机翼在向上的同时，机身后部同样受机翼上反角效应消除向心力。这就阻止飞机侧滑，飞机又回到了水平飞行。

垂直尾翼的作用是使飞机具有偏转稳定性。如果乱流使飞机机头向左或右偏转，垂直尾翼即离开原有位置。垂直尾翼远离压力中心，所产

生的反作用力足以使其又回到原来的位置。

飞行操纵面

升降舵控制飞机的俯仰运动，副翼控制滚转运动，方向舵控制偏转运动（见图1—12）。所有的操纵面都是液压操作，由三套独立的液压系统中的一套或多套提供动力，使系统失效的动力损失最小化。操纵面离开其中心位置，导致流经操纵面的气流施加一个力，按照所要求的方向移动飞机。

升降舵——爬升与下降

升降舵向上运动产生负升力，迫使机尾向下，机头向上，飞机爬升。升降舵向下运动导致飞机下降。

副翼——滚转与转弯

副翼使飞机向左右转弯，通过使飞机滚转，从而形成转弯。飞机通过滚转转弯与摩托车转弯时的倾斜相似。一边的副翼向上，升力减小使机翼向下；另一侧的副翼向下，升力增加迫使机翼向上。当达到所需坡度（坡度越大，转弯越快），两边的副翼回到中立位，飞机继续转弯。飞机改出转弯使用的是与上面所说的相反的过程。

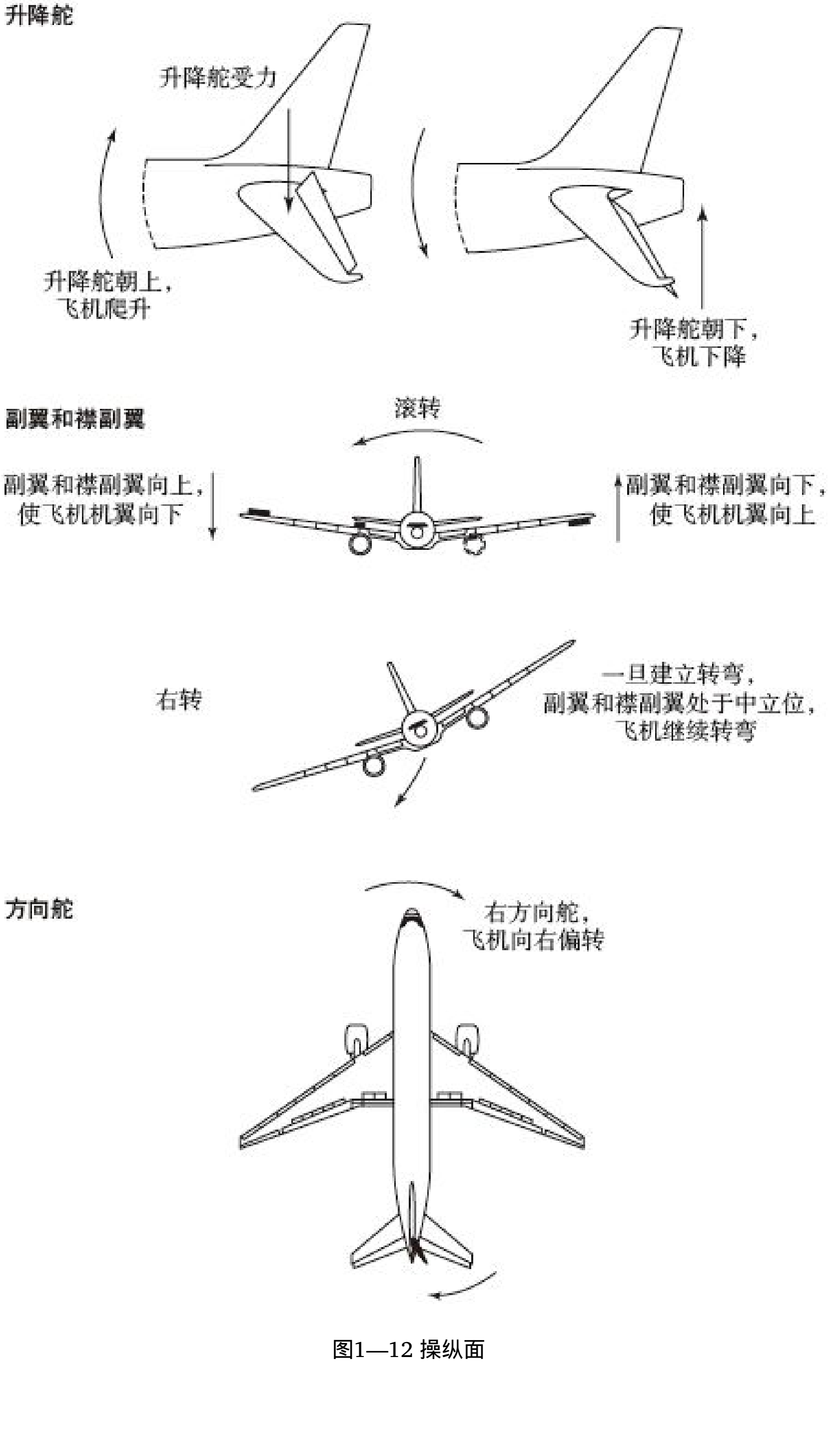

升降舵
升降舵受力
升降舵朝上，
飞机爬升
升降舵朝下，
飞机下降
副翼和襟副翼
滚转
副翼和襟副翼向上，
使飞机机翼向下
副翼和襟副翼向下，
使飞机机翼向上
右转
一旦建立转弯，
副翼和襟副翼处于中立位，
飞机继续转弯
方向舵
右方向舵，
飞机向右偏转

图1—12 操纵面



开始高速右转时，只有内侧副翼/襟副翼在工作

波音777每一个机翼上有两套副翼，靠近翼尖长而细一些的是外侧副翼，内侧副翼在发动机后面，较大，方形。内侧副翼与襟翼的作用相似，更合适的名称叫襟副翼。襟翼放出，襟副翼也随之成比例向下打开。为了增加升力，在襟翼5或以上时，外侧副翼也向下打开一些，两套副翼继续提供滚转控制。高速时，只需较小的副翼运动，外侧副翼操作被抑制。低速（正常情况下，起飞后、初始爬升、下降和进近时）需要良好的转弯能力时使用两套副翼。两套副翼在275节以下才工作，该系统由空速来设置。

方向舵——偏转

飞机在跑道上起飞加速或着陆后减速时，方向舵用于保持方向（与轮船的舵一样）。在跑道与滑行时方向舵还可操纵前轮左右转动最大至7°。有一个前轮转弯手柄用于滑行时操纵前轮更大的转动。[9]在一边的发动机动力与另一边相差较大时，会形成不对称飞行（即一发失效），此时，可使用方向舵来重新调整不平衡。高速时，只需较小的方向舵移动，方向舵比率系统在速度增加时减小方向舵的移动。

方向舵也起到偏航阻尼器的作用，它会自动运行来抑制飞机滚转与偏航的意外运动，这种状态称为荷兰滚（得名于早期荷兰水手在海上生活数月后在陆地上无法直线走路，像喝多了酒一样）。通常，荷兰滚由阵风引起，出现偏转–滚转震动，与后掠翼阻尼性能差有关。稳定系统感觉到运动，指示方向舵向相反方向运动，阻止荷兰滚出现。

扰流板——减速板

扰流板（见图1—13）扰乱机翼上表面的气流，破坏了升力。着陆时，扰流板自动打开破坏升力，使飞机的所有重量牢牢地压在机轮上。

这有助于防止飞机重着陆时弹跳，同时提升刹车效率。中断起飞时，使用反推自动打开扰流板，再次使飞机的所有重量压在机轮上来提升刹车效果。



图1—13 扰流板

飞行中，扰流板可作为减速板，使用扰流板手柄来人工打开，可快速地减慢飞机速度，或提高下降率。使用减速板，在客舱中能听到轻微的隆隆声。飞机转弯时，一侧的扰流板能自动打开来辅助实现较大的转弯坡度，因此它也可作为飞行操纵面。机翼向下一侧的扰流板自动升起，升力减小，辅助机翼向下运动。

飞行控制——驾驶盘与方向舵脚蹬

飞行操纵面的动作（见图1—14）是本能的。起飞时，达到飞行速度，向后拉驾驶盘，抬前轮达到升空所需要的机头向上姿态。着陆时，向后拉驾驶盘，拉平飞机减慢下降率，以便平稳接地。

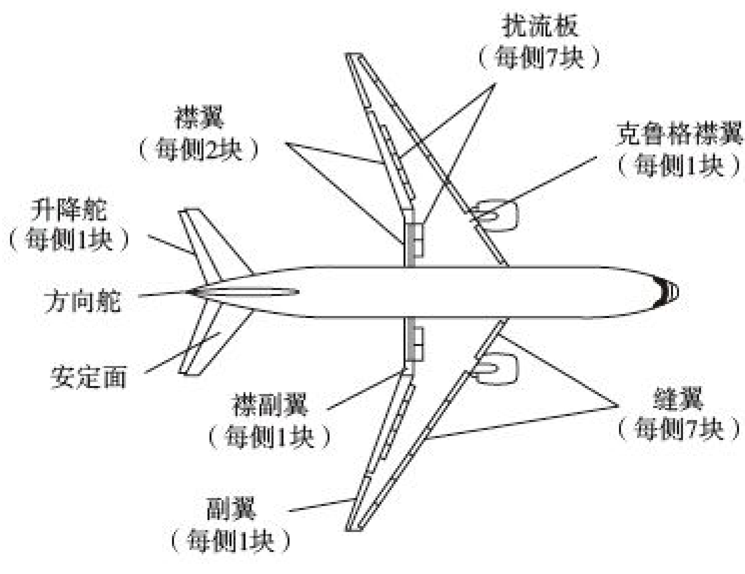


图1—14 飞机操纵面

飞行中，向后拉驾驶盘抬升机头，使飞机爬升；向前推驾驶盘，飞

机下降。向左转驾驶盘（就像转动汽车的驾驶盘），飞机向左压坡度，然后转弯；反之亦然。蹬左舵，飞机向左偏转；蹬右舵，飞机向右偏转。每个方向舵脚踏板上方都是脚尖刹车装置，用脚尖施加压力来刹车。着陆后或中断起飞要减速时，脚尖刹车向各自一侧的小车式主起落架机轮，形成对称或差动刹车（就像坦克刹车的方向控制，右边的履带使坦克向右转，等等）来补偿方向舵的控制。

直接物理操作大飞机的飞行操纵面是人力所不能及的[10]，飞行操纵面通常由称作动力控制组件（power control unit，PCU）的液压机械装置来操作，由飞机的液压系统提供动力。飞行员移动操纵系统来操作控制活门（通过钢索或电气信号线），控制活门决定输入给动力控制组件的液压，从而移动操纵面的大小。操纵面与飞行员的操纵系统之间没有直接连接，气流作用于偏转的操纵面的力，通过驾驶盘或方向舵脚蹬无法感觉到。飞行员无法直接感受到作用于飞行员操纵系统的飞行控制压力时，存在过量操纵飞机的风险。为解决这个问题，感力组件可提供人工感力，给操纵系统施加与操纵面运动相应的压力。因此，飞行员获得操纵飞机的感力，就像轻型飞机上使用钢缆把操纵系统与操纵面直接连接。的确，有时需要一定的力量来克服传送到飞行员驾驶盘和方向舵脚蹬的真实的感力组件的压力。（图1—14展示了完整的飞机与操纵面。）


低速左转（襟翼10度），内侧副翼/襟副翼、外侧副翼和扰流板都工作



飞机接地时，所有襟翼全放出，所有扰流板全升起



扰流板放出作为减速板（右机翼相同）

电传操纵

波音777的电传操纵系统使用计算机调节从驾驶杆到操作操纵面的液压动力控制组件的输出。电传操纵系统使结构设计效率更高，从而减小了垂直与水平安定面的大小，重量减轻，燃油经济性提高。

主飞行控制系统（primary flight control system，PFCS）给飞机提供俯仰、滚转、偏转的人工和自动控制，还可防止过量操纵、失速、超速、坡度过大。驾驶盘、方向舵脚蹬、减速板操纵手柄之上的位置传感器把位移转换为电信号，分别传给称作“作动筒控制电子设备”（actuator control electronics，ACEs）的4个“黑匣子”。来自作动筒控制电子设备的信号传输给三台主飞行计算机（primary flight computer，PFC）。主飞行计算机还接收来自飞机其他系统的信息，如空速、外部大气数据、姿态、迎角、发动机推力，以及起落架、襟翼、

缝翼与减速板的位置。调节后的信号再传回作动筒控制电子箱，由它传送到液压作动筒来驱动飞行操纵面。

操作电传操纵的波音777，与传统飞机完全一样，但优势更多。比如，非传统的飞机，每改变一次推力，收放起落架、襟翼、减速板，飞行员需要人工进行相应的配平。波音777飞机所有的配平变化都由主飞行计算机管理。此外，飞行员操作传统的飞机转弯，正常情况下需要向后轻拉驾驶盘保持高度。[11]而在波音777上，以正常的坡度角转弯也是由计算机管理的。波音777唯一需要飞行员配平的就是空速改变时，这与传统的飞机操作完全一样。配平电门虽然不直接移到水平安定面，但效果是一样的。飞行员驾驶波音777，会有驾驶传统飞机一样的感觉。

波音777还配备了一台或多台主飞行计算机失效的备份功能。如果备份方式系统性能轻微减弱，当在人工操纵飞机时，飞行员需为推力变化、襟翼的移位等进行配平。如系统性能进一步下降，三台主飞行计算机全部失效，则该飞机的飞行和受到的保护程度同一架传统飞机别无二致。整个电气系统尽管几乎不可能同时全部断开，但也有机械备用。飞行员可通过驾驶舱到安定面与所选定的扰流板之间的钢索维持飞机的控制，直到电气系统恢复供电。

波音777的电传操纵系统也可补偿一发失效时的偏转。推力不对称补偿（thrust asymmetry compensation，TAC）系统持续地监控发动机数据，测定每一台发动机的推力值。一台发动机的推力与另一台的推力相差大于或等于10%，推力不对称补偿系统就会自动增加方向舵使飞机偏转最小化。推力不对称补偿系统给飞行员足够的提示来识别一发初始失效，但它并不立即用满舵。使用方向舵脚蹬或手动断开系统预位可人工操控推力不对称补偿系统。

[1] 力的公制单位，以建立经典力学的艾萨克·牛顿命名。力是物体间的机械作用，其三要素为：大小、方向、作用点。牛顿和磅是不同的单位。1kN大约等于100kg或220lb物体的重量。——译者注

[2] 道面污染是指飞机降落的跑道表面不干净，存有冰、雪、水等。——译者注

[3] 北京首都机场3条跑道长度分别是：3 200米、3 800米、3 800米。西藏拉萨贡嘎机场（高原机场）跑道长度4 000米，昌都邦达机场跑道长度5 000米。——译者注

[4] 长吨（long ton 或 L Ton）是英制重量单位，等于1 016.046千克。——译者注

[5] 高温和高海拔使空气的密度减小，发动机推力减小，机翼的升力减小，不少飞机在高温和高海拔起飞时都需减少载量。——译者注

[6] 配平是飞行员常使用的驾驶技术。当飞机重心发生改变时，飞行员需要推或拉着驾驶盘保持飞机平衡，此时飞行员上下或前后按动配平开关，移动安定面的位置达到平衡，飞行员手上的力抵消。——译者注

[7] 反角分上反角和下反角，指飞机两个机翼与其横轴水平面所成之角。——译者注

[8] 侧滑是指飞机的对称面和相对气流方向不一致的飞行。与螃蟹横行有些类似。——译者注

[9] 波音777飞机驾驶舱内的前轮转弯手柄可操纵前轮左右转动70°，同时操控方向舵脚蹬对前

轮的控制。——译者注

[10] 老式或小型飞机的飞行操作是通过钢索或连杆连接的硬式操纵系统直接操纵各个舵面来实施的。——译者注

[11] 飞机转弯时，由于坡度，作用在重心上的升力倾斜，垂直向上的升力减少，需要飞行员向后拉杆，加大迎角以增加升力来保持高度。——译者注

02

喷气发动机的工作循环

1937年4月，弗兰克·惠特尔爵士（Sir Frank Whittle）[1]第一次在试车台上试用了喷气发动机，但第一架能飞的喷气式飞机是1939年8月的亨克尔He 178[2]。1949年，第一架喷气运输机彗星号[3]首次飞行，直到1958年，彗星4和波音707才开始了定期跨越大西洋的喷气飞行服务。1970年，波音747的首次商业飞行是从纽约到伦敦。1976年，协和飞机首次商业飞行，伦敦到巴林与巴黎到里约热内卢两条航线同时飞行。1994年，波音777–200首次飞行，美国联合航空公司于一年后的1995年6月投入使用。

发动机原理

喷气发动机是一种非常复杂的机械装置，但发动机的基本工作原理实际上却很简单（见图2—1）。压气机从进气口抽进空气，进行高度压缩，压缩后的空气进入燃烧室，在那里与燃油混合，发生急剧膨胀。使用的是煤油，它不会瞬间点燃，但能像民用燃料油或石蜡一样连续地燃烧。燃烧室内膨胀的空气首先通过涡轮，转动连接轴驱动压气机，再以高速从喷管排出。即使是慢车功率，人站在离进气口8米的地方也会被气流吸进压气机，在离喷管45米的地方也会被喷流吹倒。

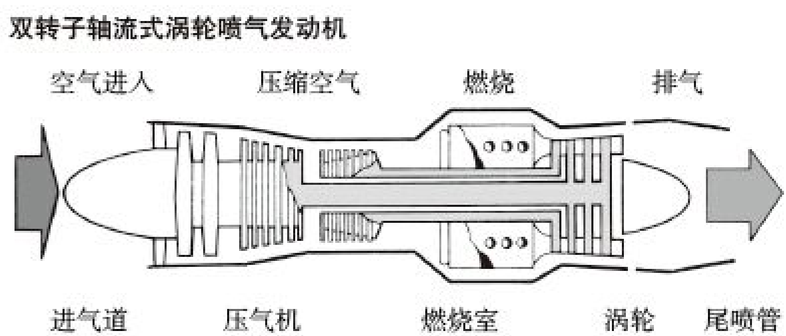


图2—1 喷气发动机

喷气发动机的工作循环

喷气发动机运行是一个连续的循环。首先，空气由压气机吸入发动机进气道。压气机的一级由一圈转动的叶片（称作转子，英文为rotor）与静止的叶片（称作定子）组成。转子叶片推动空气穿过定子叶片，压力增加。每一级压力增加相对较小，需要很多级才能产生所需要的压力。大型喷气发动机的压气机再分为两个或三个称作转子（英文为spool）的独立部分，每一个转子（spool）由自己的涡轮和连接轴单独

驱动，这样可以提升流过压气机的气流压力。压气机由字母N来表示，压气机的转子（spool）表示为N1、N2（与N3）。因此，N1对应于进气道的低压（low pressure，LP）压气机转子（spool），N2（或N3）对应于燃烧室前的高压（high pressure，HP）压气机转子（spool）。

大型发动机也可通过把一部分N1压气机的空气从发动机主涵道旁通，通过外涵道直接排到大气中，来提高驱动效率。这样的发动机称作内外涵道发动机（见图2—2）。今天的大型喷气发动机内外涵道已有相当大的发展，现代N1压气机主要由大型的单圈大叶片（称作风扇）组成，与大型的切断尖部的多叶片螺旋桨相似（参见下页的图片）。的确，风扇更像螺旋桨而不像压气机，它提供整个发动机75%的推力，将流过主发动机气流的一半空气旁通到外涵道（波音777使用的大型涡轮风扇喷气发动机能将90%的气流旁通到外涵道）。发动机的发展经过一个完整的循环，又回到螺旋桨的基本原理！

进入发动机内涵道的部分风扇空气经过N2（与N3）压气机的压缩，把高温、高压的空气射入燃烧室，约1/3的空气与燃油混合，以大约2000℃的高温燃烧，其余的空气用来冷却。燃烧室中膨胀后排出的气流通过静止的收敛型导向叶片将其直接引向涡轮叶片。该气流冲击涡轮叶片带动涡轮转动，并通过连接轴转动各自的压气机。涡轮后段的气流流经收敛型喷管继续膨胀，以高速的喷气排出发动机。

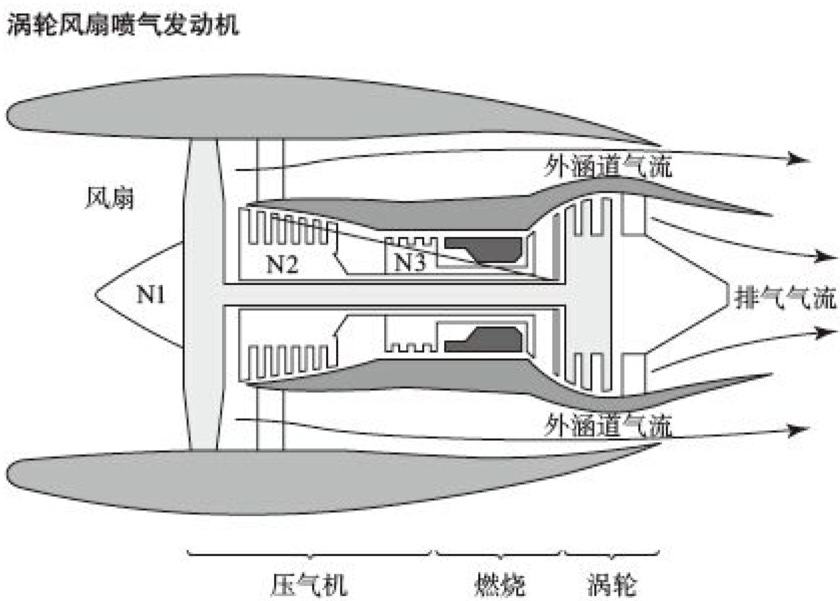


图2—2 涡轮风扇喷气发动机工作原理



涡轮风扇喷气发动机前视图



风扇排气（外涵道）包裹核心机（内涵道）

起飞时，波音777–200涡轮风扇喷气发动机最大静推力约94 000磅（417kN），每一个风扇叶片径向力等同于6辆伦敦公共汽车满负荷的动力，每一个高压涡轮叶片（约信用卡大小）产生的动力等同于一台F1赛车发动机的动力。

大多数喷气发动机的噪音是因为高速喷气穿过大气的剪切效应而产

生的。涡轮风扇喷气发动机的另一个好处就是可减少发动机噪音，旁通空气包裹住主涵道，减小了剪切效应。像波音777这样的双发飞机最为明显，发动机的外壳完全将发动机装置包裹起来。飞机的噪音以可闻噪音分贝（perceived noise decibels，PNdB）来衡量，它既表示噪音类别，又表示噪音大小。波音777重载起飞与着陆的噪音值大约107PNdB。通常，机场噪音限制白天最大为110PNdB，夜间最大为102 PNdB。减小发动机的噪音的技术通常是在一定高度把起飞推力减小到爬升推力，一般是高于起飞机场高度1 500英尺[4]。

发动机启动

发动机首先由一部小型气源驱动启动机带转到一定速度，产生足够的气流流过压气机。接着带有压力的燃油喷射进燃烧室，燃烧室内的点火器工作，提供燃油的点火源。一旦点火燃烧，发动机转速（revolutions per minute，rpm）继续上升，直至发动机能够自我运转。接着断开启动机，关断点火。发动机继续加速转动，达到慢车转速。前推驾驶舱里的推力手柄，推力超过慢车功率逐渐加大（见图2—3）。通过直接关断燃油供应，发动机关车。

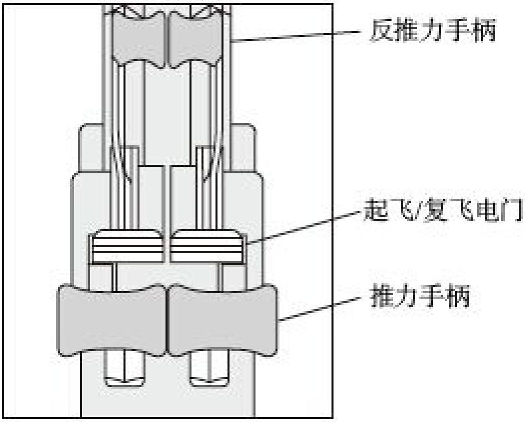


图2—3 波音777–200推力手柄

飞行中重启关断的发动机，需要保持较大的空速提供足够的气流让压气机转动。如果需要，例如在高海拔时，也可使用气动启动机。

发动机性能

喷气发动机的性能通常描述为以磅或千牛顿来表示的推力。喷气的推进力不是由喷气作用于大气而产生的，而是牛顿第三定律的实例，“每一个力都有一个大小相等、方向相反的反作用力”。喷气向后的力，在发

动机内产生一个反作用力，推进飞机向前。

喷气发动机多级增压，要比同样大小的活塞发动机产生的动力多得多，没有喷气发动机，今天的大型飞机将无法飞行。据估算，波音777起飞需要的最大功率，相当于18台类似大小的活塞发动机同时运行，而要保持正常的巡航需要的发动机更多。

喷气发动机压气机速度高达20 000转/分钟，为方便起见，以最大转速的百分比来表示，比如，巡航时正常的N1速度接近最大转数的90%，在显示屏显示为90%。短时可超过正常最大操作速度的100%，并显示实际转数（如最大起飞转数N1 103%）。波音777的风扇非常大，如通用电气公司（General Electric Company，GE）[5]的发动机风扇直径为3.12米，因此转动相对较慢。由于巨大的离心力，这种发动机100%N1转数为2 263转/分。

今天的大型喷气飞机，有些制造商在驾驶舱使用风扇（N1）速度的百分比来表示动力，有些使用发动机增压比（engine pressure ratio，EPR）来表示。发动机增压比指的是涡轮排气压力与压气机入口压力的比值。发动机指示与机组警告系统（engine indicating and crew alerting system，EICAS）的仪表上用红线标出N1和发动机增压比最大值（见图2—4）。现代发动机的最大推力值不是由机械控制的，发动机动力的设置不能超过最大计算值，出现那样的情况会导致发动机损坏。起飞和爬升时，重量允许的情况下，通常设定发动机推力小于最大值，这样可减少发动机的磨损。这些情况下的减少推力称作减推力。

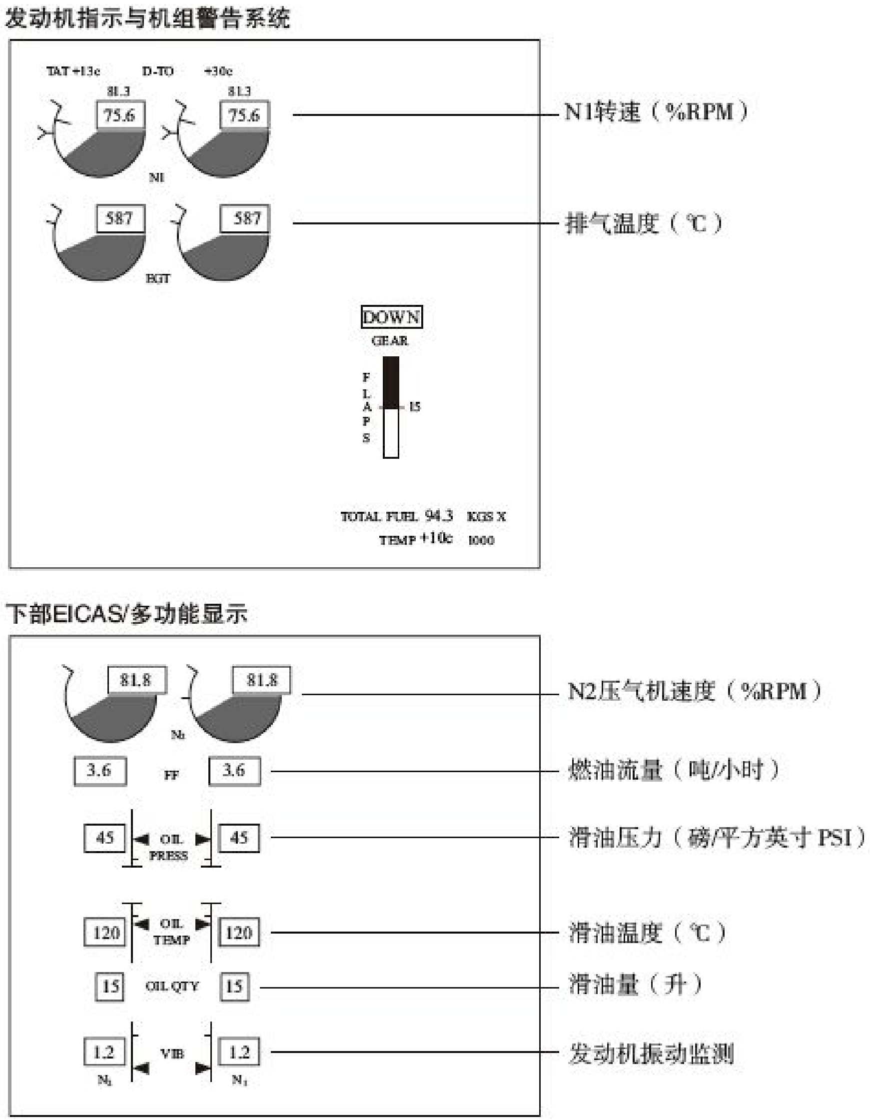


图2—4 波音777–200发动机指示与机组警告系统

下降时，推力手柄收至最后，发动机提供慢车推力，飞机差不多变成了一架巨型滑翔机。进近与着陆阶段，推力手柄使用更加频繁，N1或发动机增压比根据每一个飞行阶段所要求的速度来设置（如最后进近阶段，起落架与襟翼放下，N1约为56%，发动机增压比为1.05~1.10）。最后进近着陆时，如果另一架飞机占用了跑道，要求飞机爬升（称作“复飞”），需要最大推力复飞或足够的推力来保持最低2 000英尺/分钟的爬升率。

起飞机场海拔即使达到10 000英尺，发动机的起飞推力还是足够的，允许运行的最高高度约45 000英尺。喷气发动机性能与进气道空气

的密度成正比，所以高度增加，空气稀薄，发动机性能则降低。

高度增加，飞机的阻力也减小，到一定高度后，尽管发动机性能降低，但速度增加。同样，高转速时发动机运行效率更高，只有在高高度时，不用过多推力就能达到较高的转速。因此，喷气飞机飞得快又高（正常情况下达到43 000英尺），飞机阻力减小，发动机效率增加，喷气发动机性能的减低伴随油耗效率增加反而得到较大程度的弥补。

发动机失效

发动机失效相对来说较为罕见，当然也发生过。很多问题可能导致发动机失效，如涡轮叶片失效、鸟击发动机。显然，起飞若设置较高的推力，发动机失效可能性最大，失效的可能性据估计为300　000：1。V1（go or no-go decision speed，即起飞决断速度）前发动机失效，使用刹车，打开减速板，选择反推将飞机停下。接近V1中断起飞，是非常突然的事情，只有在出现重大事故，如发动机失效的情况下才能执行该程序。V1后发动机失效，正常情况下没有足够长的跑道让飞机停下了，需继续起飞。V1后起飞发动机失效，机组可以成功处置，正常的程序是在飞机安全爬升后收上起落架，执行发动机失效程序。继续爬升到高于机场800～1 000英尺，飞机改平飞，增速，收上襟翼。

巡航一发失效也能成功处理，可能要下降几千英尺（也许更多，根据飞机的重量）进入空气密度较大的高度来保持巡航状态。（当然，如果航路要穿过欧洲的阿尔卑斯山、美国的落基山脉或阿富汗的兴都库什山可能还有问题，不过对这些情况总是预先规划了应急航路。）飞行员一发进近与着陆是训练有素的操作（在模拟机上），也能保证安全。正常巡航高度双发同时失效（极不可能出现的情况），飞机还能在空中至少保持25分钟，减小到“最小阻力”速度，给机组提供足够的时间来重启发动机。

波音777设计时，全面调查了自喷气飞机运营以来发动机失效的所有情况。调查表明，绝大多数发动机停车都是由于辅助系统失效，如燃油泵或其驱动失效、滑油漏光、引气系统热空气泄漏导致的过热、假火警等。大多数情况下，发动机的核心部件一直非常可靠。根据这项调查，进一步研究并改进了波音777的所有辅助系统的设计，在适当的情况下还引进了备份系统。每隔一定时间，抽取飞机的滑油试样进行微观金属微粒分析，一旦发现金属污染，立刻采取纠正措施，防止将来出现问题。

发动机位置

多年来，喷气飞机设计的变化使得发动机的位置也在改变，有的悬挂在机翼下的吊舱里，有的安装在尾部，有的则把这两种安装方式结合

起来。今天所有的双发喷气飞机，发动机都悬挂在机翼下方的吊舱，下面讨论飞机外形时还会涉及。

机翼吊舱发动机

双发飞机如空客A330与波音777，四发飞机如空客A340与波音747，发动机悬挂于机翼下方的吊舱保持了机翼相对光洁的外形。

飞行中，机翼上升力对结构的弯矩效应向上，发动机向下作用的重力就成为对应的力，这样就可减小所制造机翼的硬度，从而减轻重量。机翼安装发动机也有缺点，近地面可能擦吊舱，尤其是着陆的时候，这就限制了飞机着陆时的坡度角；发动机失效，特别是起飞的时候，会导致不对称推力。V1后一发失效，飞机还在跑道上加速，会出现偏转，需要方向舵来修正。四发飞机空客A340或波音747，外侧一发失效时（即1号或4号发动机——发动机是从飞行员的左边向右编号），偏转更大。侧风起飞也会加重这个问题。侧风吹过跑道，垂直尾翼就像风车的翼，主轮变成了中心点，机头会转向风向标指示风来的方向。空客A340或波音747起飞4号发动机失效，风从右向左吹过来，飞机向右偏转会很明显，飞行员需要快速采取行动使飞机保持在跑道中心线上（见图2—5）。出现这种侧风，4号发动机称为“关键”发动机。波音777在起飞时一发失效，方向舵会自动偏转来控制方向。

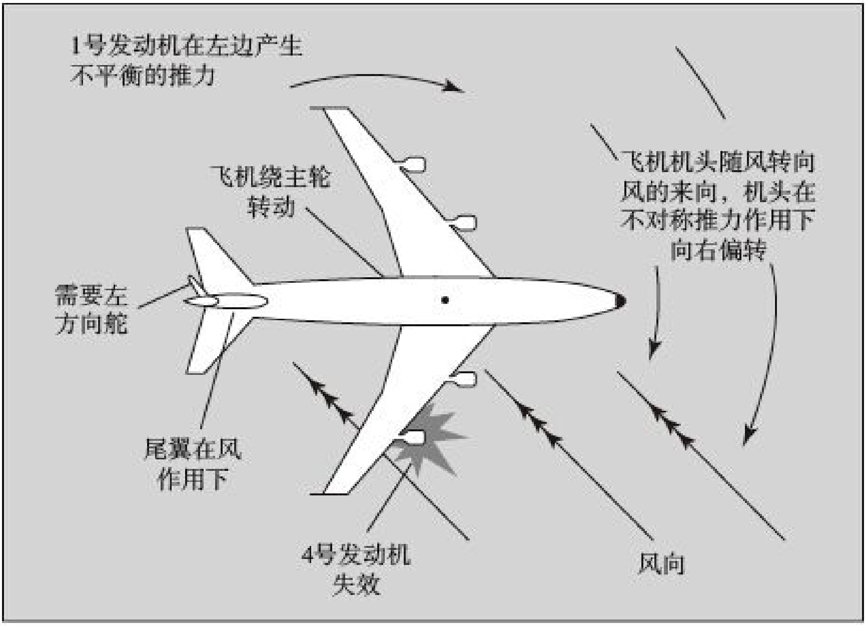


图2—5 波音747或空客A340的关键发动机

反 推

反推在着陆或发生中断起飞时，帮助飞机减速。并不是像一些人想象的那样，反推就是把发动机的方向反过来。实际上大型喷气飞机使用折流门系统关闭风扇气流出口通道，使气流转向向前约45度（见图2—6）。其他喷气飞机通过喷气外流通道与抓斗一起来向前转向气流。

折流门或抓斗位于发动机风扇排气道或喷管内，通过格栅或发动机外壳的排气孔向前使气流反向流动。选择与主推力杆相连的反推手柄来使用反推。主推力杆关断时，向后拉反推手柄确立折流门或抓斗的位置来操作反推，再向后拉则加大发动机反推的动力设置。

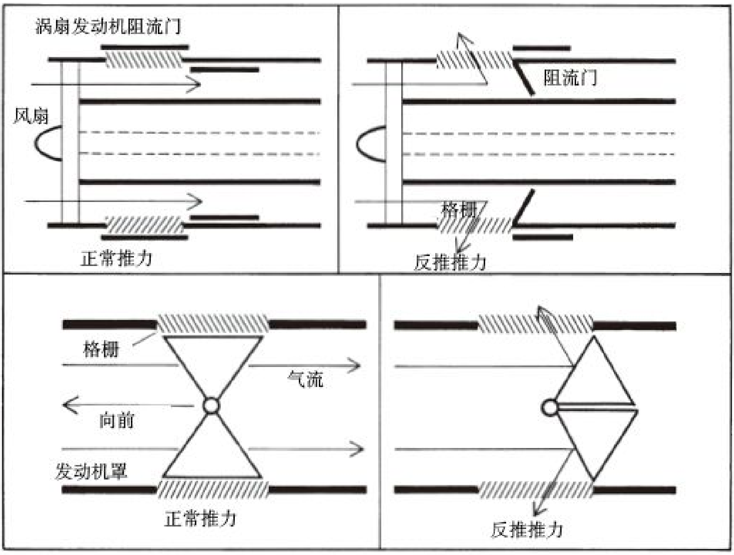
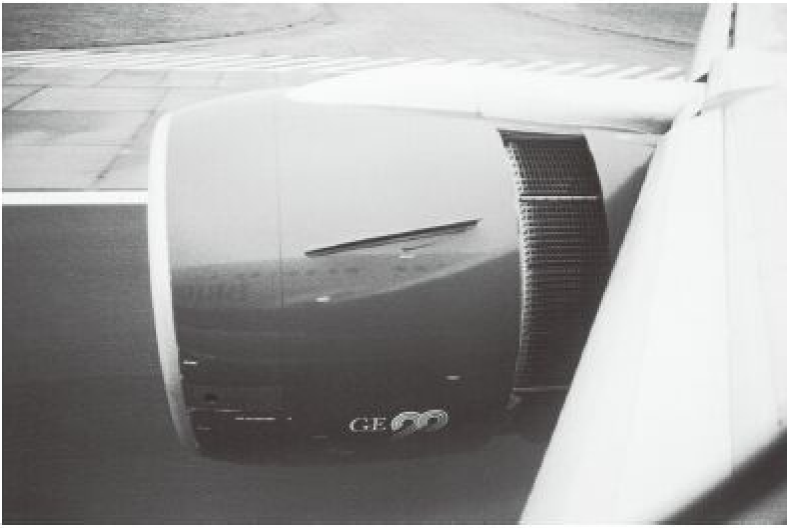


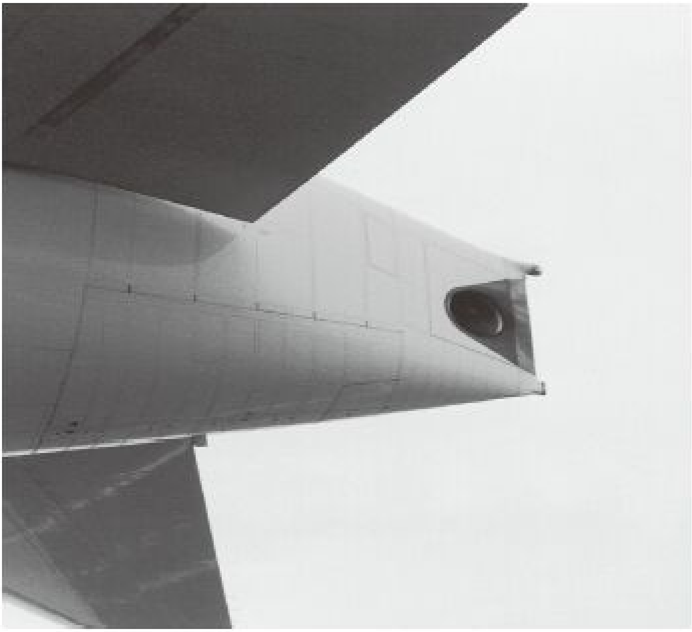
图2—6 反推装置



发动机罩上外露的反推推力格栅

辅助动力装置

辅助动力装置（auxiliary power unit，APU）是一台位于飞机尾部的小型喷气发动机，通常使用电池电源启动。发动机启动前，在地面运行辅助动力装置为所需系统提供电源和气源。波音777的辅助动力装置可在空中任何高度使用，一发失效情况下辅助动力装置可以正常启动并提供服务。为保证辅助动力装置的正常启动，甚至在外界温度–50℃冷浸数小时的情况下也能正常工作，波音777的辅助动力装置有两套启动系统，包括通常的电源启动机和气源启动系统。有些情况下，辅助动力装置甚至能自动启动。[6]各类双发飞机依据法规在越洋飞行时，保持辅助动力装置处于可以连续运行的状态。[7]过站停留时，主发动机关车前启动辅助动力装置，飞机可不依靠外部电源（如电源与空调）而独立供电。辅助动力装置的气源通常用于主发动机的启动。



位于机尾的辅助动力装置

燃油

炼油厂把原油输入大型蒸馏罐，像炖东西一样把它烧开。蒸馏后分离出各种石油衍生品，较轻的成分（汽油和煤油）位于上部，较重的成分（柴油、民用燃料油或者更重的工业用油）留在底部。余下的东西再次高温加热，进一步分离。继续加工、精炼出的每一种产品，根据不同属性最终制成可直接使用的成品。如点火较快的汽油用于活塞发动机，而煤油（石蜡）作为燃料油用于防风灯与轻便加热器，继续精炼则用于喷气发动机。

波音777–200最大燃油载荷约47 000美制加仑，或171 200升，合137.5吨。[8]波音777仅有三个油箱，中央油箱位于机腹下面，每一个机翼下各有一个油箱（见图2—7）。先使用装在两个机翼油箱的燃油。所需总燃油量超过58吨时才使用中央油箱。机翼中的燃油的向下作用力是有益的（与机翼安装的发动机吊舱相似），先使用中央油箱后使用机翼油箱，会延长燃油重力对机翼的向下弯矩。

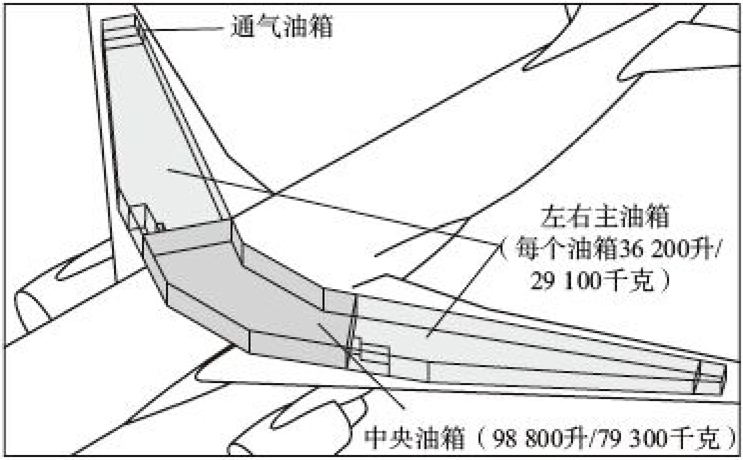


图2—7 波音777–200油箱位置（非全比例）

起飞前设置好波音777的燃油系统，整个飞行过程中它就会自动运行，只有中央油箱用完时才需要飞行员关断中央油箱的油泵。该系统部件的冗余度更大，燃油计量是数字式的，更为准确。发动机启动前，中央油箱有油则需要打开所有的燃油泵。中央油箱的燃油泵比机翼油箱的燃油泵动力大，这样确保先使用中央油箱的燃油。

通常情况下，使用停机坪下面的地下油库来为飞机加油，位于飞机旁边的加油车把燃油抽出送进油箱。有时候，飞机停在远机位，就需要加油车。加油时使用防静电接地线把车辆和飞机与地面连接起来，防止不安全的静电积聚。燃油管连接到机翼下的加油口，泵以每分钟800加仑的速度把燃油抽送进油箱，内部相互连接的管路把燃油输入到所有油箱。通常有些燃油会留存在油箱，此时只需加够飞行所需的燃油，平均加油时间约为25分钟。加油口的加油控制板和驾驶舱的加油面板上有油量表，显示已经加载的燃油量，加油完成要核对加油车上的油量表以验证加油量。抽样检查燃油是否有水分，如果超过一定限制，在高空会冻结并阻塞燃油过滤器。

计算机根据预报的风、温度、预计飞行高度计算每次飞行所需的油量，并以飞行计划燃油的形式把这些信息提示给飞行机组。平均7~8小时的飞行，波音777需要约45~50吨燃油。还需要携带改航所需燃油、到备降机场所需备用油（以防万一），通常约为6~7吨，比如纽约改航到波士顿、伦敦改航到曼彻斯特、新加坡改航到吉隆坡。这些增加的意外情况储备燃油，如其名称所示，只有在出现打乱飞行计划燃油的情况下才可能使用，如预报风出现不利变化，分配的高度层低于预期（导致燃油消耗过多），在目的地机场由于流量或天气而导致等待延误等。超过基本要求的燃油称为额外燃油。表2—1所示的是伦敦到波士顿飞行的燃油数据。

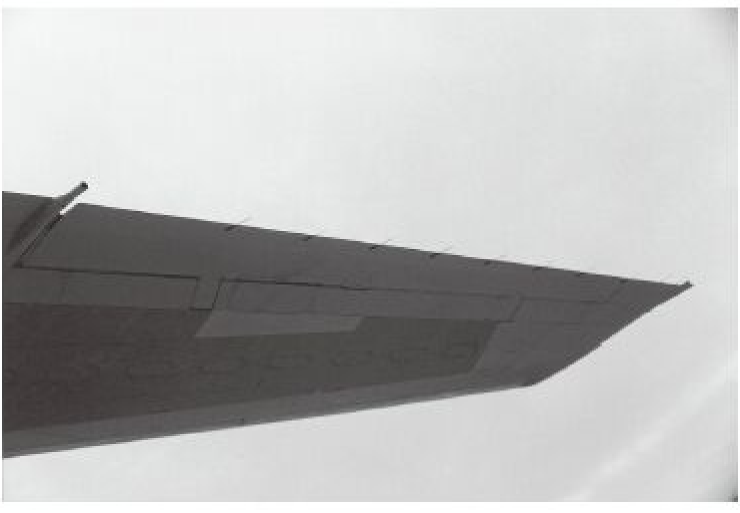
表 2—1 伦敦到波士顿飞行的燃油数据

	燃油（吨）	时间
到波士顿所需燃油及时间	42.6	6 小时 40 分
改航所需燃油及备用油	7.2	1 小时 10 分
储备燃油	1.4	15 分
额外燃油	0	0
	51.2	8 小时 5 分

从伦敦到波士顿总共所需的燃油是51.2吨，正常只用掉42.6吨燃油，总油量使飞机可在空中保持的最长时间，即续航时间，为8小时5分。

有时，如果预报到达目的地机场时的天气恶劣，预计可能出现重大延误，就需要携带额外燃油。是否携带额外燃油并不能轻易决定，任何重量增加（不论是乘客、货物还是燃油）都会导致燃油消耗增加，所携带的额外燃油的很大一部分（如，每小时3%）因为额外燃油的重量而实际上消耗完了。（据计算，定期航班上多携带一小袋食糖，将每年增加一升的燃油消耗。）另一方面，如果预计有延误或天气不好，绝对有必要带够足够的燃油，民用飞机不能在空中加油，飞机一旦升空就得靠自身的燃油。

航空界最无奈的两件东西，据说是“飞机后面的跑道”与“油箱中余下的燃油”。我们常听见飞行员说，带足燃油和给妈妈带点东西。考虑到燃油短缺与物价飞涨，这句话该改一改。机长要承担携带最低需求燃油的压力，要考虑飞行安全与相关法律规定。某些地区出现不可预见的恶劣天气，其他地方由于交通流量增加而导致经常性的不可预料的延误，足够的燃油与飞行中燃油用完之间的界限的确非常模糊。机组出于安全考虑宁可带足燃油，这一点不足为奇。他们说，在地面上燃油很贵，但空中燃油则无价。



另一方面，飞行中可能要放油，其步骤也很简单。紧急情况下，尤其是起飞后不久一发失效，需要返回离场机场，通过放油把飞机的重量减到着陆重量。打开活门，以每分钟2吨的速度泵出燃油从喷嘴放掉，喷嘴位于每一个机翼后缘靠近襟翼外侧，这样可以快速减轻飞机的重量。

正常巡航条件下，计算机计算出所需发动机的动力设置与飞机的速度。燃油消耗后重量减小，发动机动力设置相应减小，重量减小后飞机能够爬升到下一个更高的航路飞行高度层（flight level，FL），通常是爬升4 000英尺[9]，如此飞行更省油。巡航时燃油的消耗随重量、高度而变化，对波音777而言，大约是6~7吨/小时（约2 300美制加仑，合8 000升/小时）。[10]

高空中外界大气温度（outside air temperature，OAT）可能低至零下60℃或70℃，需要加热燃油防止发动机油滤结冰。燃油自身的冰点为零下50℃~零下40℃，如果油箱温度下降到接近冰点时，则需要下降到气温更高的高度。还需要不时检查燃油状态。从计算机算出的到目的地所需的飞行计划燃油量减去飞机上所显示的实际燃油量，所得到的数值与飞行计划燃油的需求进行比较。任何意外事件，如强逆风、低于所请求的飞行高度层等，可能减少备用燃油。若燃油检查时发现明显误差，需要提早采取措施。

现在，燃油状况是世界航空公司最感兴趣的话题，因为燃油成本至少占去总运行开支的1/3，同时，不谈成本，燃油很快就会用光。有估计说，石油储备将在30年后用光。航空业在世界石油总消耗量中占比仅约4%，但到目前为止，除了燃油没有其他东西能够维持该行业的生存。液态氢可能作为一个备选项，现在还在对其用途进行研究。液态氢的问题是，需要的体积太大，而且这种燃料存在安全问题。氢的泄漏会导致液体立即蒸发，而该蒸气具有易燃性。尽管有这些问题，氢燃烧的优点还是让它成为极具吸引力的替代品，不过广泛应用还需要时间。

[1] 弗兰克·惠特尔1907年6月1日出生于英格兰。1927年在毕业论文中提出了喷气发动机的原理。1930年提出了设计方案并申请了专利。1976年移居美国。1996年去世。——译者注

[2] 德国飞机设计师亨克尔与喷气发动机设计师冯·奥亨合作制造出第一架喷气飞机，由飞行员Erich-Warsitz驾驶，在Rostok-Marienehe机场起飞。——译者注

[3] 英国德·哈维兰公司1946年开始设计，1949年7月27日原型机试飞，1952年5月2日正式投入航线运营。速度达788千米/小时。后因连续发生事故，引起航空界对结构疲劳的重视和研究。——译者注

[4] 1英尺＝0.3048米。——译者注

[5] 波音777飞机的发动机由3个厂家提供：美国的GE航空发动机公司，美国的P&W普·惠公司和英国的RR罗罗公司。——译者注

[6] 波音777飞机在空中，两套交流电同时断电时，辅助动力装置将自动启动，提供电源。——译者注

[7] 为确保双发飞机在飞越海洋和荒芜地区时有与三发、四发飞机相同的安全性，航空法规对双发飞机飞越上述地区时有相应要求，如备降机场等，其中包括辅助动力装置工作的要求。——译者注

[8] 1美制加仑＝3.785升；1英制加仑＝4.546升。——译者注

[9] 飞行航路上的高度层为间隔2 000英尺，一来一回。所以同向飞行临近的高度层间隔4 000英尺。近年，随着机载设备精度提高，符合缩小垂直间隔标准的飞机间隔缩小至1 000英尺。——译者注

[10] 平均到每一位乘客，约3升/100千米，飞机的耗油量要低于小汽车。——译者注

03

无线电与雷达

无线电基本理论

交流电（alternating current，AC）指的是电流方向周期性地来回流动的电流。电流与时间构成正弦波（见图3—1）。电流从零点开始增加，沿一个方向达到最大值，然后穿过零点再从相反方向达到最大值，接着再回到零点。这样的一个循环就称作周期，其最大值就是电流的振幅。交流电在1秒内完成周期的次数称作频率，表示为周/秒，或赫兹（Hz），以纪念生活在19世纪后半期的德国物理学家赫兹[1]。

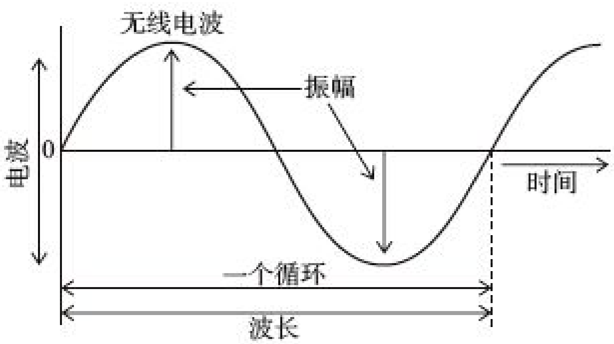


图3—1 正弦波

交流电以一定的频率被输送给合适的天线，天线本身不带电，但能以电磁波形式向空中传播电能，这就是无线电波。向空中传播的电能包括交流电电场和交流电磁场，两者以直角相交。比如，垂直天线产生主垂直电场和水平磁场。这样的信号就称为垂直极化无线电波（见图3—2）。接收天线也需垂直才能确保有效地接收。

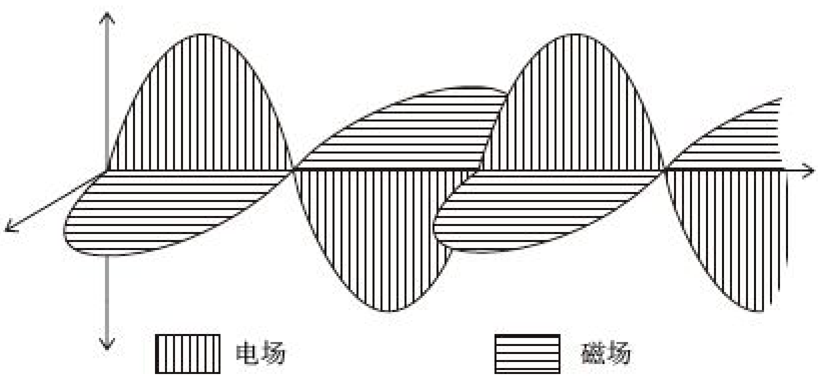


图3—2 垂直极化无线电波

频率

频率1秒每周等于1 Hz；1 000 Hz等于1千赫兹（kHz）；1 000 kHz等于1兆赫兹（MHz）；1 000MHz等于1千兆赫（GHz）。航空传播表示为千赫兹、兆赫兹、千兆赫。

波长

波长指的是无线电波在一个周期内传播的距离，表示为米或厘米。

频率和波长

频率与波长有关，无线电波传播的速度等同于光传播的速度。

频率（Hz）×波长（米）＝光速（米/秒）

例：计算200kHz传播的波长。

波长（米）＝光速（米/秒）÷频率（Hz）

＝300 000 000÷（200×1 000）

＝1 500米

频段

频段包括一定的频率范围。每一个频段有适合于自身特性的用途，如通信、导航辅助或无线电信标等。比如，航空通信频率位于高频和甚高频段。

甚低频（very low frequency，VLF）	3~30 kHz
低频（low frequency，LF）	30~300 kHz
中频（medium frequency，MF）	300~3000 kHz
高频（high frequency，HF）	3000~30 000 kHz
甚高频（very high frequency，VHF）	30~300 MHz
特高频（ultra high frequency，UHF）	300~3000 MHz
超高频（super high frequency，SHF）	3~30 GHz

相位

电流的相位指的是周期内电流瞬时的状态，其范围是0°~360°（见图3—3）。同一频率上两个无线电波的传播可能相同也可能相异。任何两个无线电波的相位差，不是用于某些导航设备，就是在甚高频通信起干扰作用。

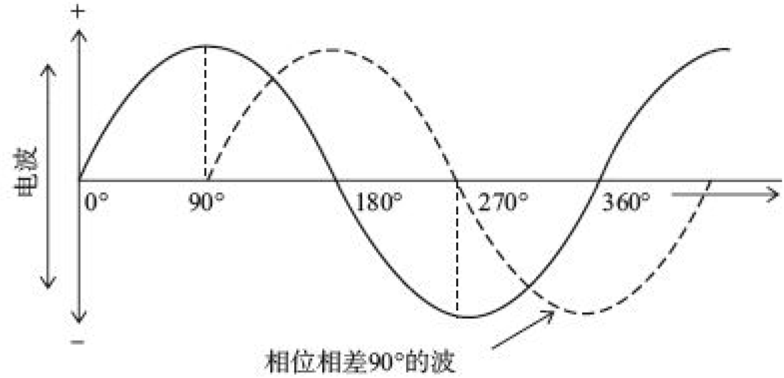


图3—3 两个电波的相位关系

传播途径

从一个天线传播出的信号会向所有方向散播射电能量。无线电波到达接收器的途径各异，取决于发射器的功率、接收器与发射器的距离、传播的频率。无线电信号传播途径可分为两种基本的传播形式——地波和天波。

地波

地波也分为直达波、地面反射波、表面波。从发射器沿直线传输到接收器的地波称作直达波，经地面反射到达接收器的称作地面反射波。直达波的传输，从接收器沿直线可“看见”发射器，称作“视线”（有的无线电波能够穿过房屋或建构物，而无法穿过山脉或地平线）。直达波与反射波传播途径不同，其接收可能不同相，会引起信号的衰落或暂时丢失。正常情况下，只有在甚高频与更高频段中高于30MHz时，才会出现“视线”接收。

紧贴着地球表面传输的地波称作表面波。低频段的一大特性是出现衍射现象，使无线电波增强传输到更远的距离。表面波也出现在较高频率，但范围仅限于几海里。

天波

天波指的是经电离层反射再返回地面的无线电波，传输距离较远。太阳紫外线使得电子从气态的分子中分离出来，产生带正电荷的微粒离子。

电离层从离地面约50千米延伸到400千米，以离子的形式构成独特的“离子层”。白天出现4个主要的离子层，夜间没有太阳的紫外线照射，只剩下两个离子层。白天较低的离子层吸收无线电波，导致天波反射减弱。夜间吸收层散开后，在高频与较低频段出现大量的天波反射，传播范围增加，接收效果增强。

无线电波经离子层反射，再弹回地面，再继续反射，其传播范围可达8 000海里[2]以上。甚高频段与较高频率，因波长太短无法从离子层反射，也就很少出现天波。

传播途径小结

图3—4阐明了4种情况：

①飞机既接收直达波，（或许）又接收地面反射波。
②飞机仅接收表面波。
③飞机仅接收天波。
④飞机接收不到任何信号。

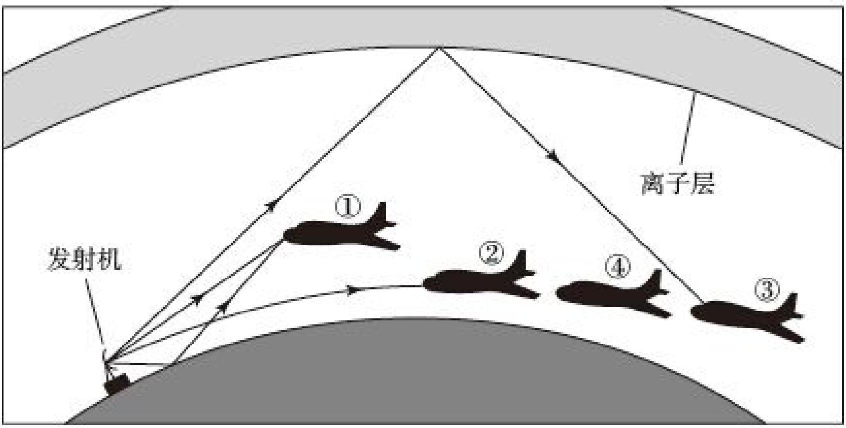


图3—4 传播途径

在第4种情况下，飞机高于地平线无法接收信号（不能接收直线的视线信号），又在表面波的范围之外，位于第一天波范围之内。选取其他频率可增强接收效果。如果不行，飞行员只能等待，直到飞机飞到所使用频率的接收范围之内。

频段的特性

每一个频段有自身的特性，与特定的用途相适应。在甚低频和低频段，产生较强的表面波和天波，可用于导航设备的远距信号传输。大多数的广播电台位于更适合广播电台的中频段，静电干扰处于可接受范围。在高频段，其超长的范围可用于远距通信，但静电干扰非常明显。甚高频范围有限，但能提供清晰、几乎无静电干扰的短距通信。在特高频和超高频段，波长较短适合于脉冲类型的传输，用于雷达与某些导航设备。

所有的民航无线电传输都在高频和甚高频段。在甚高频段，商业和国内电台频率范围为88～108MHz，航空频率为108～136.95MHz。因此

航空爱好者想听航空通话的声音需要有整合了航空甚高频的专用无线电台才行。

无线电发射的类型

无线电发射器根据所要求发射的信号进行不同类型的发射。最简单的发射就是在固定频率上连续地恒幅发射。这种简单的无线电信号自身不带任何信息，发射形式为摩尔斯电码（Morse Code）[3]。在通信频率波段，所使用的无线电频率太高，无法产生可听音，人的耳朵仅能听到达到8kHz频率的信号。音频太低也不适合有效传输，在接收器上把无线电频率与音频结合，通过太空来传输其综合波，就可克服这一困难。接收器再把这两个频率分开，把音频输送给扬声器或耳机。

这种频率的结合就称作调制，无线电信号作为载波携带音频信号。有两种调制，一种是调幅（amplitude modulated，AM），载波的频率维持恒定，调节其振幅；另一种是调频（frequency modulation，FM），载波的振幅维持恒定，调节其频率。

民航通信是调幅式的。在甚高频波段，发射相对来说没有静电干扰，但无线电“噪音”对高频信号就构成问题。把无线电波与声波结合来发射，使得载波频率得以稍加扩展，这就称作频带宽度。在发射机上抑制一边的频带宽，就可提升高频无线电的调幅信号质量。频带变窄降低了无线电的噪音大小，提高了有效范围。这种传输就称作单边带（single sideband，SSB），信号的一边称作上边带（upper sideband，USB），另一边称作下边带（lower sideband，LSB）。调频发射用于某些导航设备。无线电噪音影响的是振幅而不是频率，调频信号没有干扰，用于甚高频无线电广播。

甚高频无线电通话

飞机的驾驶舱通常安装有三部甚高频无线电。通过选择器来调频率，其数字显示可以精确地调谐。在200海里范围内与空中交通管制（air traffic control，ATC）台的通信使用甚高频。超出这一范围需要高频通信，有些偏远地区就需要航路上的中继电台，把沿航路的信号转发给空中交通管制中心。报告也可通过另一架飞机来中继：电台接收范围内的飞机传送接收范围之外的另一架飞机所发送的信息。这种空中传播的情谊超越了国界，沙特阿拉伯航空公司为以色列航空公司传送信息，奥林匹克航空公司为土耳其航空公司传送信息，巴基斯坦国际航空公司为印度航空公司传送信息等，都司空见惯。

正常情况下，沿航路的每一个报告点要发送位置报；雷达管制下，如美国和欧洲，通常省略位置报。发送的位置报包括报告点的实际到达时间（actual time of arrival，ATA）、飞机的飞行高度层、下一个报告点的预达时间（estimated time of arrival，ETA）。

随着飞机的飞行，飞行员从一个管制区到达另一个管制区，有时频率的改变非常快。欧洲的短途飞行，比如从法兰克福到伦敦的1小时短途飞行，频率改变甚至超过12次。同一频率每次只有一个人能在无线电

上讲话，要么是飞行员，要么是管制员，每个人需轮流说，通常通话的量相当大。两个人同时讲话，就可听到明显的啸叫声。（初次听繁忙的航空频率的大多数人，对通话的超频繁非常吃惊。）为增加甚高频频率的可用数量，在频率间引进了8.33kHz的间隔，也就是说每0.1MHz变化可供12个电台使用，比如132.065MHz。

目前正在开发一种设备来防止同时发话，如果一个频率正在使用，则通过电子方式来抑制另一飞行员的无线电通话（radiotelephony，R/T）。此时，这名飞行员听到的是其他人的通话而不是自己的。一旦话筒卡阻会有目视警告信号，紧急情况下还有超控设备可用。

每一个飞行员仔细听自己的呼号，通常后面跟上某些指令，比如“美航1，右转航向320”，接着飞行员重复这个信息再执行。（几个航空公司的呼号：英国航空公司——Speedbird，国泰航空公司——Cathay，爱尔兰航空公司——Shamrock。）在美国，大型喷气飞机要在呼号后增加“重型”（Heavy）[4]，如“Speedbird Five Heavy”。

有些无线电通话短语是严格标准化的，如“over”指的是发话结束期望回答；“out”指的是发话结束等。（不要使用“over and out”。）

然而，由于当今频率拥挤杂乱，标准的无线电通话术语在实践中也有所修改，有些标准术语依然在使用，如“roger”表示“信息收到”；“wilco”表示“将执行指令”；“expedite”的意思是“赶快”；“affirmative”表示“是”；“negative”表示“不”。整体上标准化的缺乏并不影响无线电通话的质量。而实际上，航空无线电通话是职业化标准最高的。那些精确而又省略的信息和一些非常礼貌的话语混杂在一起。“早上好，法兰克福，我是Shamrock 1，飞行高度层350”；“早上好，Shamrock 1，雷达识别，省略位置报”。在美国，无线电通话更加不正式，更加生动，主要还是由于交通流量大的缘故。

英语是航空的国际语言，而且必须是可用的，但使用英语并非强制要求，在很多欧洲国家，如法国、意大利、土耳其，都广泛使用当地语言。即使你会讲英语，学习无线电通话的术语、短语并适应不同国家语言的诸多特殊性，几乎相当于学习另一种语言。有时甚至难以理解普通英语表达的内容，尤其是某些国家，如韩国，他们的发音很成问题。

无线电通话中的英文拼读使用音标字母。旧的音标字母过去使用的是英语男性的名字，现在仅剩下“roger”，仅用于在飞行员的无线电通话中表示“信息收到”。今天的音标字母更具国际味道，从图3—5就可看出。所有飞行员都能快速而容易地使用音标字母来拼读（尽管并非总拼对）。大多数飞行员都使用本地发音来拼读无线电信标或位置报告点，一旦遇见通信困难，就使用识别字母而不再使用音标字母。比如，比利时的“Bozhurishte”无线电信标，识别代码为“BOZ”，可简单拼读为“bravo oscar zulu”。飞行员也要求学会摩尔斯电码，所有的无线电信标识别码都以摩尔斯电码来发送。

	语音识别字母	摩尔斯电码			
A	Alfa	•—	M	Mike	——
B	Bravo	—•••	N	November	—•
C	Charlie	—•—•	O	Oscar	———
D	Delta	—••	P	Papa	•——•
E	Echo	•	Q	Quebec	——•—
F	Foxtrot	••—•	R	Romeo	•—•
G	Golf	——•	S	Sierra	•••
H	Hotel	••••	T	Tango	—
I	India	••	U	Uniform	••—
J	Juliet	•———	V	Victor	•••—
K	Kilo	—•—	W	Whiskey	•——
L	Lima	•—••	X	X-ray	—••—
			Y	Yankee	—•——
			Z	Zulu	——••

图3—5 语音识别字母与摩尔斯电码

飞机沿航路飞行，飞行员仔细查看飞行计划单，记录报告点的到达时间、飞行的高度层、预计到达下一报告点的时间、所使用的无线电频率。正常情况下，1号甚高频用于通信，[5] 3号甚高频用于紧急频率121.5MHz，并时时监听该频率。2号甚高频用于其他情形。飞越繁忙地区，如中东地区，1号和2号甚高频都用于通信。在非洲上空时，如欧洲到南非的航路，2号甚高频选取126.9MHz。就通信而言，非洲依然是“黑色地区”，无线电通信往往很差。有时，飞越整个国家，机组都无法联系上任何一名管制员。作为一种预防措施，飞行员使用126.9MHz相互发送位置报。如果出现危机，联系不上管制员，飞行机组在这个频率上完全靠自己来安排间隔。

一套甚高频也常常调到甚高频气象广播。大多数大机场，本场条件，如风、温度、高度表气压设定值由自动终端情报服务（automatic terminal information service，ATIS）来广播，如法兰克福的108.2MHz。一些航路管制中心，尤其是飞越欧洲，在甚高频上广播很多目的地的天气，如布鲁塞尔127.8MHz、日内瓦126.8 MHz、伦敦128.6MHz。一些公司也有自己的甚高频频率，用于飞机与其代理人的通信。123.45 MHz用于飞行员飞越大西洋时的普通聊天频道。

一旦出现紧急情况，要在空中交通管制当时所使用的频率上发布遇险信息，如果联系不上，使用121.5MHz紧急频率，前面加上“Mayday”（源自法语，意思是“帮我”）并重复3遍。遇险的飞机接着发送这些信息，如飞机的呼号、遇险性质、位置、高度，如有可能还包括飞行员的意图。

现代飞机很少出现无线电完全失效，一旦出现，有现成的程序引导飞行。不同国家对该程序有不同的理念，但正常情况下飞机能在无线电静默的情况下继续飞往目的地。如果起飞后就出现无线电失效，天气晴好的话，飞行员可以返回到离场的机场。如果在仪表飞行条件下，飞机保持最后所分配的巡航高度层，然后爬升到飞行计划上所指示的巡航高度层。一直保持该高度，直至到达目的地机场上空的等待点。机组应该设法按照飞行计划所预计到达的时间飞越到等待点，然后在到达等待点10分钟内开始下降，在30分钟内着陆。

无线电通信过程中发生很多有趣的事件，每一名飞行员都有自己最喜欢的故事。下面讲两个我觉得挺有意思的故事。

两架荷兰皇家航空公司飞机在孟买管制区向相反方向飞行。两架飞机相互经过时，在管制频率上用荷兰语交流了几句。这一区域通信并不怎么好，经常难以联系上孟买管制员，有些信息需要多次重复。孟买管制员听到荷兰语，认为一定有一架飞机在试图联系管制员。听完两架飞机的对话，孟买管制员发话："呼叫孟买的飞机，请再说一遍，听不清楚你的发话。"

在曼彻斯特，英航飞机的机组在跑道等待点等待起飞，注视正在着陆的F27（福克友谊）[6]飞机。不幸的是，这架飞机着陆跳跃得很厉害，这时听到英航飞机发出的声音："哎呦，这才像福克嘛！"几乎在同时，F27快速回答道："是啊，美好的友谊也差不多要走到头了！"

高频无线电通话

高频无线电用于所有的远距通信。每一个发射台分配大约6个频率，这样就可覆盖所需的范围，同时考虑到了白天和夜间条件的差异。通常，白天所需的频率较高，范围更远；夜间所需频率较低，范围更近。用于通信的主频率是根据情况来分配的，一旦出现通信困难往往要使用备份频率。有些电台使用任何频率都无法联系上，这并不少见。

飞越北大西洋、太平洋、澳大利亚、新西兰、远东[7]，高频通信非常好，尤其是使用单边带通信。但飞越亚洲、非洲大部分地区，则完全是另一回事。地面设备落后、维护差，维持与现代飞机的联系有些问题。静电干扰非常大，飞行员如果想要联系地面，往往简直是在空中大声喊。全球很多电台可能使用的是同一个频率，呼叫开罗、喀土穆、孟买、巴林、科伦坡、甚至远到新加坡，能同时听见语音通信。在一个频率上发送一个简单位置报几乎都不可能，更不用说来回数千海里发送其他信息了。由于经常出现通信困难，高频无线电通话就比甚高频通话要正式得多。飞行员发话结束使用"请讲"（go ahead），而不是所推荐使用的"over"，他们似乎是为了更清晰地发话而使用"Charlie"而不是"affirmative"。

幸好飞行员无需一直坐着戴着耳机听这些刺耳的声音。使用一种选择呼叫系统（Selcal），一旦有电台呼叫飞行员，就会提醒他们。每一架飞机都有自己的像电话号码的四字代码，如BDKL，管制员可选择该

代码来发送信号并启动这套系统。驾驶舱里可听见谐音，琥珀色灯闪亮。飞行员戴上耳机就可回答呼叫。当然，有时选择呼叫也不工作，飞行员没有别的选择，只好像正常情况下一样戴着耳机仔细听。

使用一个高频频率的管制员管制的范围相当大。香农（shannon）与普雷斯蒂克（Prestwick）[8]合并在一起构成香威克（Shanwick）管制区，向西延伸至西经30°。另一边从格陵兰到加勒比海由甘德（Gander）[9]管制区来管制，包括加拿大海岸、纽约。甘德和香威克的频率分别为2 945kHz、5 638 kHz、8 854 kHz、13 288 kHz，上边带。

高频也用于发送机场天气预报。比如在大西洋，从香农（8 833kHz、5 533 kHz）向所有欧洲目的地机场发送天气预报，从纽约（5 652 kHz、8 868 kHz）向所有美国东海岸目的地机场发送天气预报。高频还向全世界发送时间信号。大多数国家在高频向世界广播，如BBC国际广播与美国之音。

数据链通信

数据链是一种电子空/地通信服务，通过甚高频数据链（VHF data link，VDL）网络，在飞机与地面电台间发送数字文本信息（信号转换为数码），只要在其范围内，以及偏远地区拥有卫星通信（satellite communication，satcom）系统即可。数据链用于空中交通管制目的，可以让装有数据链设备的飞机进行双向电子通信，而无需使用语音通信。在繁忙的空域，空中交通管制数据链通信减少了无线电频率的拥挤，减轻了飞行员与管制员语音通信的工作量。在太平洋与北大西洋地区，卫星通信数据链空中交通管制信息已经在那些装有数据链设备的飞机上使用，用于发送航路、飞行高度层许可以及常规的指令，如速度限制指令。空中交通管制数据链信息的飞行许可与指令非常精确，没有歧义，语音通信只是在需要时作为备用。

另一种数据通信系统Gatelink用于机场，以较高速度在地面上停着的飞机、航空公司各个部门、空中管制服务部门之间发送数字数据。Gatelink已经在选定的一些机场试运行，通过无线局域网离场前向飞机驾驶舱与客舱发送海量数字数据。天气更新、电子地图、手册等，可直接上传到驾驶舱系统，航空工程部门可下载维护信息、飞机性能数据、发动机趋势分析。在客舱里，旅客名单、时刻表、餐饮要求等，甚至用于飞行中娱乐的数字电影，都可直接发送到客舱使用。空中交通服务部门也可通过自动终端情报服务使用Gatelink发送当前机场天气、离场延误、分配的离场（升空）时间等。

飞机通信寻址与报告系统

飞机通信寻址与报告系统（aircraft communications and reporting system，ACARS）是一种机载系统，向其范围内以及偏远地区卫星通信系统的用户，通过甚高频数据链网络来接收、存储、寻址和发送数字信息。该系统可用于双向航空公司或空中交通管制通信，可以自动发送与

接收数据，飞行员也可通过飞行管理计算机（flight management computer，FMC）的控制/显示组件（control/ display unit，CDU）来人工发送与接收。该系统也可自动记录、向航空公司基地转发飞行进程详细信息，如起飞时间、升空时间、着陆时间、到达候机楼时间。天气信息、舱单详情、飞行计划数据、航空公司信息等可自动发送到该系统，飞行员可在控制/显示组件屏幕上阅读，还可使用机载打印机打印出来。飞行员也可在控制/显示组件屏幕上输入信息或请求，发送回航空公司基地或空中交通管制中心（air traffic control centre，ATCC）。

飞机状态与监控设备能够记录发动机性能和其他数据，维护计算机能存储故障详情，也可在需要时按下启动测试，通过飞机通信寻址与报告系统自动下载这些数据到航空公司基地进行工程分析。

离场前，航路的导航详情、航路风、性能数据，可以通过飞机通信寻址与报告系统自动上传到飞行管理计算机，并在控制/显示组件屏幕上用页面形式显示出来。机组在飞机上获得了飞行所需的所有自动导航信息。机组也可下传起飞条件，如温度、风、气压设定值、使用跑道、预计起飞重量等，通过飞机通信寻址与报告系统向中心计算机请求性能数据。根据计算的业载来选定起飞重量并计算出起飞速度、所需的发动机起飞功率设定值、在该条件下最大起飞重量等，再上传给飞行管理计算机。飞行管理计算机接收到实际起飞重量，并将自动在飞行员的主飞行显示器的速度带上标记起飞速度。

通过飞机通信寻址与报告系统，数据链可发送空中交通管制许可与指令，并在控制/显示组件屏幕上清晰而准确地显示出来。飞机通信寻址与报告系统也可通过甚高频数据链或卫星通信定期向空中交通管制中心自动发送位置报，飞行员无需发送无线电位置报，尤其是长途航路上。来自卫星导航全球定位系统（global positioning system，GPS）的导航数据可用来证实位置是否精确。

雷达基本理论

一次雷达

雷达（radar）一词源自“无线电探测与定位”（radio detection and ranging）。雷达发射出一个无线电信号，遇到物体后反射回一个弱回波，据此原理来探测物体。回波的强度取决于很多因素，包括发射信号的强度、反射物面的形状与材料、“目标”的大小与距离。

已知发射信号的传播速度，根据发射信号与接收回波的时间差就可简单测出目标的距离。如果发送的是连续的无线电信号，就无法测出时间差，所以雷达发射机就发出一连串非常短的称作脉冲的无线电能量短脉冲，接收到这些间隔脉冲所反射回的回波后，也就可以测量开始发射脉冲到开始接收相应回波脉冲的时间差。波长要较短才能防止尾波遮蔽弱回波脉冲的头波，尤其是接收来自近距离目标的回波。水平运动或垂

直运动的雷达扫描器发射出的信号形成很窄的波束，回波在雷达屏幕上呈现出一个光点，显示出反射目标的方向与距离。机载气象雷达就是一次雷达的实例，遇到暴风云中出现大水滴就反射出回波；精密进近雷达（precision approach radar，PAR）也是一次雷达，用来监控在恶劣天气情况下飞机在机场的进近。无线电高度表的工作也是基于这个原理。

二次监视雷达

二次监视雷达（secondary surveillance radar，SSR）指地面发射的雷达信号被称作应答机的机载小型接收器/发射器所接受，作为应答再发出第二个信号，由地面雷达接收器接收。地面接收的总信号远比一次雷达探测的弱回波强得多。二次雷达的另一个优势就是应答机发射的频率与地面雷达发射机的频率不同。由于雷达接收器调到应答机频率，所发射的雷达信号弱回波可能被目标反射，或被附近的暴风云反射，从雷达屏幕上消失。二次雷达显示的目标图像更加清晰。应答机还能发射编码信号，在雷达屏幕上更明确地识别飞机。

改进型的S模式应答机也能在飞机和管制员间提供数据链，可以发送印刷信息，如空中交通管制许可。S模式还改进了对飞机的选择性问询过程，把干扰降至最小。

如今几乎所有拥挤空域的空中交通管制都在与装有应答机的飞机进行通信，多数国家要求高于一定高度的飞机需装有应答机才能进入管制空域。

雷达运行

监视雷达

雷达的运行在一次雷达中讲述过。首先要主动识别飞机，这需要靠飞行员使用其他信息源，如无线电信标台来证实。把飞行员报告的飞机与该信标台的方位和距离，与雷达屏幕显示的光点所代表的位置进行比较，这样就可明确识别飞机。也可请求飞机转到某一个航向来进行识别，这从雷达屏幕的光点方向变化就可证实。世界上某些地区仍在使用这种雷达。

二次监视雷达

二次监视雷达运行更加精密和复杂，使用机载应答机来运行，如前文所述。管制员给每一架飞机发布一个代码，飞行员在应答机上拨这些编码，这样就可在雷达屏幕上识别飞机。发送这些编码就称作“发送信号”（squawking），初始联络时，管制员指示飞行员把应答机拨到某一个编码，如“应答机编码A 1133”。如有需要，飞行员也可按下应答机上的识别按钮，雷达屏幕上的光点增大，有助于更明确地识别飞机。如要求识别，需在告诉编码时加上“识别”（ident）。接着飞行员在应答机上选择“A 1133”，并按压“识别”按钮。飞行员还需要记住某些紧急情况下

的特定代码，如无线电完全失效或劫机。应答机上也有一个可发送飞机高度的设备，在雷达屏幕相应的光点处显示一个数字。它现在已经在广泛使用，但有些国家没有相应的地面设备。

精密进近雷达

精密进近雷达在天气不好时用于仪表着陆系统（instrument landing system，ILS）的飞机监控，尽管名为进近雷达，相似环境下也可用来监视离场。由于该设备并非必需，而且价格高，只用于那些地形较为复杂的机场。

地面管制进近

军方使用更多的是地面管制进近（ground control approach，GCA）。雷达管制员向飞行员发布航道和下降率指令，引导飞机向仪表条件下的跑道正常进近，无需仪表着陆设备来辅助。如果民用机场仪表着陆系统无法使用，偶尔也会用到地面管制进近。

雷达管制

世界各地使用雷达的高度不同。由于成本问题，几乎所有第三世界国家都没有航路雷达，很多机场也没有雷达。在欧洲，雷达往往用于监控飞行进程，而不是用来引导飞机，除非在离场与进近阶段。正常情况下，飞机按照飞行计划所分配的航路飞行，由雷达来监控。个别情况下，若需改变预定航路，需给出雷达航向。



雷达天线

美国则完全不同，更多强调雷达管制。飞机先按照事先分配的离场航路与飞行计划航路飞行（以防飞机按照飞行计划航路飞行时无线电完全失效），飞机升空后立刻由雷达管制接管，沿航路由雷达航向指引飞机。有时飞越整个美国空域都不按照飞行计划航路飞，雷达管制连续不断地发布航向，飞行员一路上从一个雷达管制区转换至另一个雷达管制区，不断地改变频率。这种雷达管制可沿直线飞越很长距离，而不是让飞机一个航路接一个航路地飞。使用导航设备，飞机可以自动领航直飞到数百海里之外，节约了时间和燃油。在欧洲直飞航路也很普遍，但空域拥挤且长度有限。

美国有大量的轻型飞机，管制员常常在屏幕上发现很多未经识别的光点。管制员会呼叫飞行员注意附近的活动情况，用时钟方位向飞行员指明飞机的相对位置，12点就是正前方。比如“10点有活动，距离3海里，高度不明”。低空轻型飞机密度大，航空公司飞行员把机场附近的空域戏称为“印第安人保留区”。

太阳活动

强烈的太阳活动有时会严重影响无线电设备的运行。通信、导航、雷达系统都容易受到暂时的干扰。高频通信尤其易受到影响，甚高频发送也可能失去信号，有时无线电完全中断可持续数小时，无线电导航设备，如甚低频频段的欧米加[10]，可能暂时毫无用处，甚至地面电话线也可能受到干扰。

太阳干扰与太阳黑子活动有关，11年一个周期。一个典型的干扰起始于太阳耀斑突然爆发并进入太空长达许多英里。太阳耀斑发射出X射线、紫外线、大量的带电粒子，形成太阳风。这些放射物几分钟就达到地球，约20分钟后（有时长达20小时），带电粒子撞击地球大气。赤道地区大气层最厚，两极地区最薄，那里空气更冷、密度更大。进入大气的粒子在太空中燃烧，靠近两极地区粒子深入大气中，在极地电离层的低高度中产生巨大的电离作用。这种干扰可持续数日。

20小时后（有时长达72小时后），低度到中度带电粒子（质子和电子）在极地地区也进入大气层，引起巨大的电离干扰，影响地球磁场。这些粒子最后在低空大气中燃烧，产生晃动的光线，在北极称作北极光，在南极称作南极光。

[1] 海因里希·鲁道夫·赫兹（1857—1894），德国物理学家，于1888年首先证实了电磁波的存在。——译者注

[2] 1海里＝1.852千米。——译者注

[3] 美国发明家摩尔斯（1791—1872）于1837年创立。由信号代码“点”读作“的”和“划”读作“答”组成，通过不同的排列顺序来表示不同的英文字母、数字或符号。——译者注

[4] 美国机场有多条跑道，加上“重型”后，空中管制员在安排降落跑道时会予以考虑，同时考虑起飞飞机的尾流。——译者注

[5] 1号甚高频当正常电源供电故障时，冲压空气涡轮电源和电瓶电源还可供电。——译者注

[6] F27飞机由荷兰福克公司制造，为32~52座涡轮螺旋桨飞机。1955年首次飞行。——译者注

[7] 远东是欧美人使用的地理概念，他们以欧洲为中心，把东南欧、非洲东北称为“近东”，西亚附近称为“中东”，把更远的东方称为“远东”。——译者注

[8] 香农是爱尔兰西部城市。在喷气式飞机问世之前，它是北美—欧洲航线的中途加油站。普雷斯蒂克是英国西北部城市，离格拉斯哥不远，有苏格兰面积最大的机场。——译者注

[9] 甘德是加拿大最东端纽芬兰省的一个小镇。美国“9 · 11”恐怖袭击事件发生时，通过大西洋航线飞往美国的飞机，有50多架客、货机降落在甘德机场。——译者注

[10] 欧米加（OMEGA）是20世纪60年代全球超远程双曲线无线电导航系统，依靠全球17个超低频无线电台，作用距离10 000千米。——译者注

04

导航简史与导航图

从腓尼基人的航海到库克船长的探险[1]，世界的海洋为人类的创造力所征服，见证了最原始的条件下导航的卓著功勋。最早的旅行者并未见过仪表、海图、时钟，但他们的第六感可以预知天气，读懂天象，如今的人们却无法做到。技术进步带来了导航的准确性，这在过去闻所未闻，但也永久地失去了与自然的亲近，那时人们凭直觉就知道月圆月缺，看一眼太阳就知道是不是正午。如今在这个计算化的世界，非常精准的手表随处可见，设备可以把人送到月球，很多大型喷气飞机上装备惯性导航系统（inertial navigation system ，INS）已非常普遍。

随着导航的发展，25年前民航领航员[2]就已经退出这个行业。尽管今天我们不再有领航员，但他们多年的服务依然应予以充分肯定。他们借助一张狭窄的办公桌繁忙地工作，使用的是200年以前就在用的相同的基本技术，只不过航行比那时快了100多倍。

领航员使用铅笔与航图来导航，他们需借助很多短距与远距无线电辅助设施，有时还要使用六分仪。六分仪预先设定好要找哪颗星，把六分仪向上穿过驾驶舱顶板的一个孔，通过星星来确定位置。穿过北非广袤的撒哈拉沙漠，领航员只有靠星星来辅助他。

如今，所有的大型喷气飞机都在使用某种形式的计算机来导航。实际上，某些地区，如北大西洋航迹跟踪系统，如果飞机没有装载必备的计算机导航设备就不允许飞行。今天对计算机导航的精确性提出更高的要求，不是指从一个地方领航到另一个地方，而是在始终拥挤的天空保持飞机之间精确的横向间隔。

惯性导航系统的出现是导航史上最伟大的突破，一下子就取代了掌握基于数个世纪航行所积累的知识与技能的领航员。尽管大型喷气飞机不再有飞行领航员，这本书还是包括了导航实践与设备方面的内容，一方面是因为这些内容非常有趣，另一方面是因为这些知识对理解其他章节的解释与信息很有用。本章节还包括了导航的发展简史。

导航简史

世界各地导航最初发展的时间各不相同，但早期的技术往往走的是相似的路线。比如，在南太平洋所使用的导航方法与地中海早期航海的人们几乎没有差异，但与西方不同，那里的人们数个世纪之后差不多还保留相同的方法。

人类到达南太平洋被称赞为一次领航的壮举，到底是领航技术上的壮举，还是一次偶然，仍在争论之中。人们知道的是，波利尼西亚与密克罗尼西亚的领航人借助星星的运动路线航行了数百海里，或许最远到达过夏威夷，这一事件他们世代口头相传。他们记住了每一次航行的诸

多细节，对太阳与星星的运动知识了解得非常清楚。他们不仅知道基本的领航技巧，还知道怎样运用复杂的修正方法来使领航更加准确。

在北方航行，北极星在太空静止不动，为他们指示出北方，大熊座也容易辨认。在南半球，他们从南十字星与南天极星可以知道南方。他们知道在赤道地区，全年星星都在地平线同一个地点升起和落下，但太阳升起的地方却在变化，不论是从北方还是从南方看，星星显然都在向赤道运动。

对南太平洋的领航人而言，天空就像一个巨型繁星罗盘。他们不仅采用基本的导航星，还根据洋流的大小使用不同的导航星。有些航线所使用的导航星还可以计算出偏航角，风刮在船帆的效应力使得船头的方向与船尾航迹不在一条线上。航行中，一般情况预计的都是直线对着港口，没想到的是船跑到另一个岛上去了。冬季的天空与夏天不同，领航人每次航行需要记住全新的导航星。

当然，任何航行只有一半的时间是在白天，这就需要其他的领航源头。太阳是最主要的辅助手段，察看桅杆的影子来保持航线，并作出适当的修正。了解局部风也可作为次要的辅助手段，当天空完全被云覆盖看不见太阳或星星时，白天主要的辅助手段是大洋涌浪，领航人从船的运动就能探测到它。波浪是由局部风吹过海洋表面而形成，但涌浪是由像信风这样的风产生的，它可长时期地保持其方向与速度，沿着风向长达数百海里。领航人根据局部的波型就可探测到特殊的涌浪，然后把它们作为航向参照。领航人需要掌握重要的技巧，把主涌浪与船的运动区分开来，波涛汹涌的大海或许可构成很多局部性的波型。这些技术需要多年的实践才能掌握，据说很多领航人通过他们的睾丸感受到涌浪的运动，这是解剖学上最敏感的身体部位。你也可以把领航看作是凭直觉来判断。

因此擅长领航的那些人，不论是白天还是夜晚，甚至是喝醉了棕榈酒[3]的时候，也能一叫就走，航行数百海里最终准确到达某个小岛。

在地中海，星星、局部风与地标也是早期水手判断方向的主要源头，但他们较早就开始使用某些工具来辅助领航。早在古埃及时期，水手就普遍使用测深绳来测量深度，浅水时就使用探尺。他们或许还有一些书面的航行指令。测深绳后来加上了一个小的勺子，就成为他们最早的真正的领航辅助工具。深度测量非常可靠，勺子可以舀起一部分海床上的东西，就此指明海岸的类型，也包括船的位置。使用领航工具来确定位置的最初尝试就这样实现了。

在遥远的过去，人们就学会了如何根据星星的运行来行驶，唯有腓尼基人最先发现了用星星来领航，开启了那个时代的长途航行。公元前2000多年前，他们的贸易就遍及地中海，甚至穿过称作“海洋之门”的直布罗陀海峡[4]，进入浩瀚的大西洋。

我们对他们的领航方法一无所知。他们凭借自己的能力垄断了远洋贸易航路，积累了大量的财富，他们的领航技术成为严守的秘密也就不

足为奇。晚至公元63年到65年，才有文字证据显示，人类使用星星不仅仅是指示方向，还用来定位。诗人卢坎（Lucan）提到，罗马的水手把高高的北极星作为领航辅助手段，“永不坠落的轴，双熊座最明亮的星”。

腓尼基人可能到过不列颠，或许更北的地方，这也没什么不可能。他们很可能还到过亚速尔群岛[5]，如果纯属偶然的话，可能到过美洲沿岸，只是还没有证据证明他们曾到过这些海岸。差不多900年以后，维京人才宣称他们也是另一群会航海的人。

公元后一千多年中，领航技术几乎没有变化。维京人出海探险所使用的领航原理，与之前的腓尼基人没有什么不同，改进也很小。他们留下的证据表明，他们知道太阳偏角[6]的变化，知道使用一些天然的工具来测量太阳的高度。他们乘坐小船，尽可能靠近海岸行走，进入过地中海、亚得里亚海，穿过大西洋到达冰岛和格陵兰岛，极有可能到过美洲。

维京人之后的200年间，航海图与罗盘的使用使领航得到革命性的改变。到底是维京人还是阿拉伯人最先运用磁引力原理还不确定，也还无法确定罗盘的最早使用时间。人们很早就知道天然磁石能磁化熟铁，旋转它就能指向正北和正南。对中世纪的普通水手而言，这无疑是一种巫术，他们心存极大的疑虑，只是在没有其他任何辅助手段可用时才用到它。

早期人们把熟铁针放在木板上漂浮在水盆里，只有在海上最平静的时候才能使用。把天然磁石在铁针上晃动几下就可暂时磁化它，铁针停下来后就呈南北指向。再后来人们转动指针，这样罗盘与天然磁石就成为领航员职业中一件熟识的工具。从希腊人最初的风向盘可以看出，它有8个点来指示主要的方向，第一个水手罗盘也采取了相似的设计，最后再分为32点，再分为64点。15世纪晚期，指针和风向盘组合到一起，把罗盘用一个盒子装在一起。盒子对准船的前后轴，根据其基线刻度就可看出船的前进方向。16世纪初，罗盘放置在一个平衡环上，但没有考虑磁差，即真北和磁北的不同。

大约在13世纪后半叶出现的航海图更像一份列出各种信息的清单，而非今天详细的航海图。根据法语中的“routier”（道路）一词，把它称作航迹图，包括详细的潮汐、深度、地标、方位等信息，以及大量有用的其他信息。这些知识并非所有水手都可知晓，它由领航人严密保守且独自占有。航海图上标出罗盘刻度盘，以便测量恒向航线[7]（与经度线成等角相交），直到16世纪后半叶，墨卡托（Mercator）[8]才在航海图上用罗盘方位线来准确推算真航向。

最初，人们利用北极星和正午的太阳来测量纬度，用桅杆或类似的东西来粗略估计高度（身体高于地平线的角度）。到了15世纪，人们改进了天文学家的天体观测仪、象限仪、十字杆等，使它们用于航海。天文学家早在数百年前就使用天体观测仪，后来又用上了象限仪。每一种

仪器都用到了铅垂线原则，但在船上却非常难以使用，领航员有时不得不跑到岸上去看。后来十字杆（见图4—1）取代了这两种仪器，制作起来最简单，使用起来最容易。16世纪末，人们把它改进为反测器（the back and fore staff），一直使用了300多年，后来为六分仪所取代。

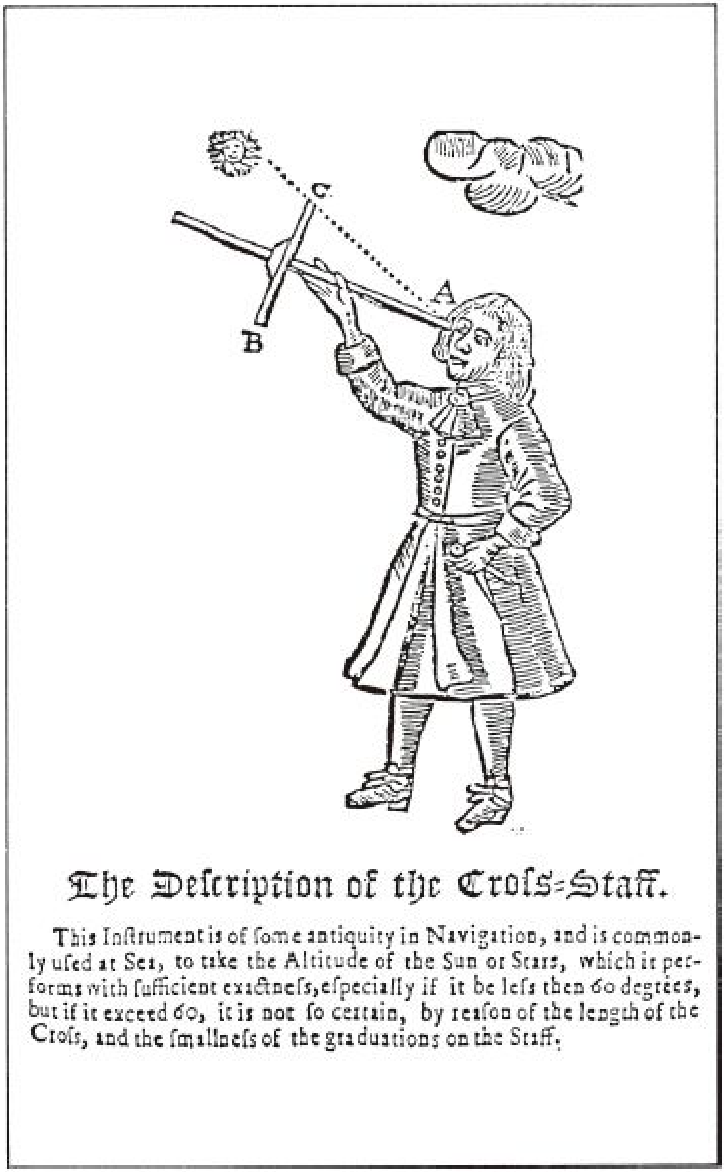


图4—1 十字杆

那时，人们依然使用航迹推算法来估计经度，用罗盘看航向，时间则由船上侍者不断地转动沙漏来测量。对速度的准确记录依然还是难题。最初，人们把一大块木材或圆木从船头抛向船尾，计算它走过船的长度的时间，称作抛木块计算航速法，或者叫作荷兰人算法

（Dutchman's log），这个词进入航海语言，指用船上的木头来测量距离和速度，今天还在使用。

后来，人们给圆木系上绳子，木头向船尾流去，直至流过船的尾迹。在剩下的绳子上每隔一段打上一连串结（knots），松开绳子后，计算一段时间内流过船首的结的数量，这样计算的速度就更加准确。今天领航员还在使用节（knots）来测量速度，等于1海里/小时。

使用罗盘和航海图后的500年间，领航技术的改进，仅限于对一贯的做法进行改善。人类航行到遥远的海洋，首先让船沿着所需的纬度航行，这样就解决了难以获得经度的难题，然后沿这条纬度航行至目的地。要是航行到孤岛，问题就严重了。如果已经过了预计到达的时间，就很难弄清楚是经过了这个岛而没有看见，还是预计的时间不准确，还没有到这个岛。领航员要作出决策，是继续航行还是往回走，这让他们十分忧烦。很多人因为作出错误的决策而丧命。

17世纪中期，查理二世在伦敦附近的格林尼治修建了皇家天文台[9]。18世纪初，伦敦设立了“经度委员会”，提供大量经费来奖励那些解决这个难题的办法。船上携带精准的计时工具一直被认为可能解决经度问题，但出现精密计时表之前没有这样的工具，它在18世纪中期才出现，其准确度达到惊人的每天误差在1/10秒之内。

经度问题解决了。格林尼治天文台的天文学家和科学家合议把穿过格林尼治的子午线（该条经线穿过格林尼治，把南极和北极连在一起）作为经度测量的基准。船上的精密计时表把时间设定为格林尼治的时间，根据太阳的高度就可确定船所在位置的当地正午时间，同时记下格林尼治时间。地球转动的角速度为15度/小时，格林尼治与当地正午的小时差乘以15，就是该地离格林尼治的经度，也就是船的经度。时至今日，格林尼治标准时间（Greenwich Mean Time，GMT）已正式称为世界协调时（Universal Time Co-ordinated，UTC），全世界依然把它作为船舶与航空的标准时间设置。1884年，国际上采用了格林尼治子午线（零度经线），在格林尼治天文台用黄铜线标识出来，参观者可以两腿分开，一只脚站在东半球，一只脚站在西半球。

18世纪上半叶，有人制作了一张有磁差的世界地图。18世纪后期，对六分仪进行了全面改进，八分仪投入使用。现在罗盘上也有刻度了，指针也永久性地磁化了，通过阻尼可以稳定地看到读数。

这种技术200多年几乎没有变化。第二次世界大战引入无线电辅助手段，20世纪后半叶人类使用仪表领航。之后，惯性导航系统出现，并在40多年前投入使用，它革新了现代导航实践，导航技术再一次开启了新局面。

时 间

太阳

从根本上说，时间与太阳有关。地球绕着自己的轴转动一周所需的时间就是一日。地球在轨道上绕着太阳转一周算作一年。地球自西向东转，太阳东方升起西方落下，所以，东边的时间比西边的时间早。沿经线自北向南、自上而下，时间不会变。

地球转动轴与绕太阳运动的平面形成一个夹角（见图4—2），地球每天都在转动，太阳在早上升起，似乎是爬上天空，然后又落下，在黄昏慢慢消失。太阳垂直于观察者顶点，就是当地的正午，也被视为处于天空最高的位置。地球绕自己的轴转动，同时围绕太阳运转，这两者结合起来就让夏天的太阳显得明显比冬天高，导致一年中的天气经历季节性的变化。

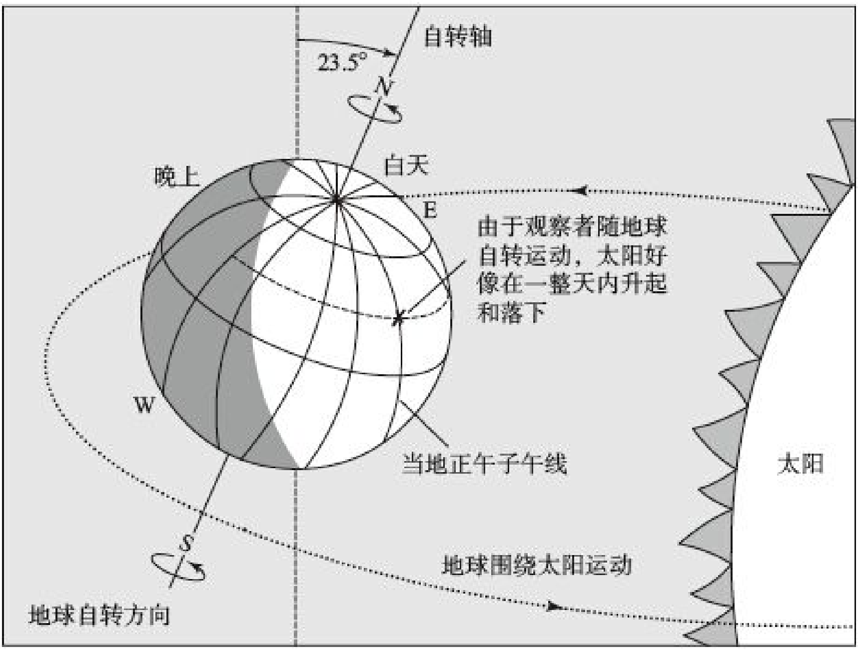


图4—2 地球与它的转动轴

地方平均时

地方平均时（local mean time，LMT）测量的是某一点的时间，同一经线上不同地方的时间才会相同。伦敦的地方平均时就比加的夫[10]早几分钟；同样，纽约要比华盛顿的时间早几分钟。为了使一个国家的时间统一，通常以靠近这个国家首都的经线的地方平均时为准（见图4—3）。比如，英国以格林尼治的地方平均时（即格林尼治标准时间）作为整个不列颠群岛的标准时间，夏季则在格林尼治标准时间基础上加1小时用作夏令时间。像一些东西较长的国家，如美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚，国家内又分为不同时区。

地球的经度分为360°，格林尼治以东180°，以西180°，地球24小时转动360°（15度/小时），经度和时间就有一个简单的关系，两个地方经度相差15°，两地时间就相差一个小时。一个地方的时间比格林尼治标准时间早3个小时，该地的经度就为东经45°（即在格林尼治子午线以东45°）。因此，把格林尼治子午线作为基准，格林尼治标准时间作为世界标准时间，把一个地方的经度除以15，就获得该地与格林尼治的小时差（见图4—4）。同样，知道时差，就可算出一个地方的经度。

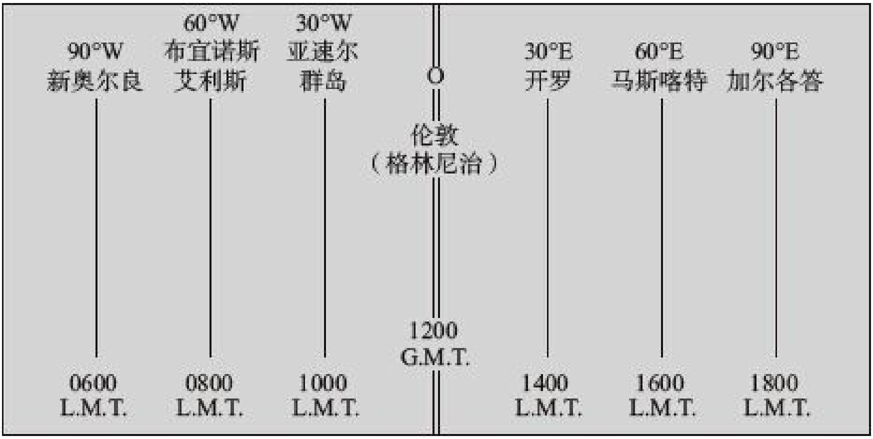


图4—3 地方平均时

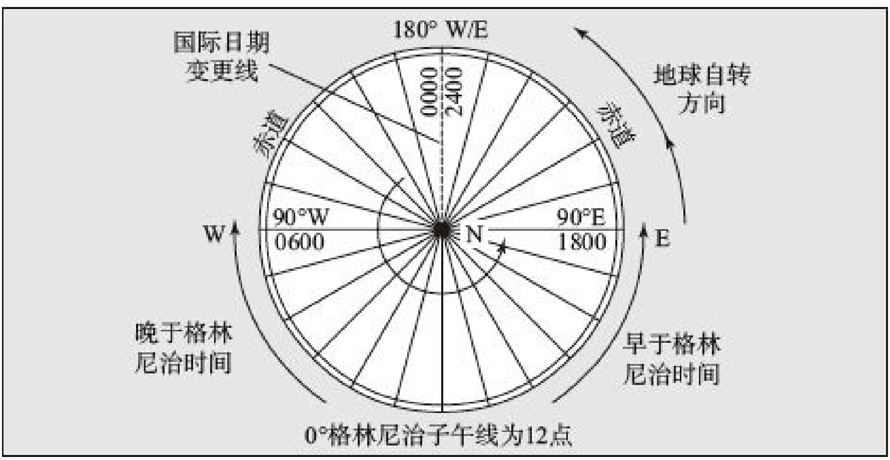


图4—4 经度与时差

时区

地球每15度就划分为一个时区，每一个时区相差1小时。实际上，有的时区边界发生了改变，使其恰好与国界重合，或者为了把一些群岛包括进同一个时区对时区边界进行了重新调整。

国际日期变更线

格林尼治向东每15度就增加1小时，东经180°（格林尼治时间之前）的时间就比格林尼治早12个小时。格林尼治向西每15度时间就晚1小时，西经180°（与东经180°为同一条线）就比格林尼治晚12个小时。由于东/西经180°在同一个地方，就存在一个比格林尼治标准时间早12小时，另一个却比格林尼治晚12小时的情况，也就是说，时间相同但日期不同。为解决这个问题，就确立了国际日期变更线。过了180°经线，就又出现一次变动以使其符合国界。比如，格林尼治标准时间是星期一正午12点，日期线以东将变成24点，即星期一午夜，日期线以西则是0点，即星期天午夜。

这时从西向东穿过日期线，比如说从火奴鲁鲁到斐济，向西飞过日期线几海里，大约一分钟就进入星期天午夜；两分钟后又到了日期线以东几海里，这时却是星期二凌晨午夜刚过一分钟。星期一已经过去了。同一时刻自东向西穿过日期线，差一分钟就是星期一午夜，再过两分钟，旅行者会发现时间却是星期一凌晨午夜刚过一分钟，又得再过一个星期一。要是那天是圣诞节，一年就要过两次节了；要是那天是新年前夜，向另一个方向旅行，则会错过节日庆祝，对很多人而言那就是一场灾难。

夏时制

第一次世界大战期间，英国政府认为，工作日把人们赶出酒吧几小时，夏季利用几小时的日光让人们早点起床，这样就可提高生产。政府采取行动，下午关闭酒吧，夏季把时钟向前拨一小时。工人原来早上8点开始上班，夏季依然是时钟上的8点上班，实际上还是早上7点，仅仅把时钟向前拨快一小时，整个国家都被哄骗早些起床。现在夏时制还在使用，全世界很多国家都采纳了，春季时钟拨快一小时，秋季拨慢一小时。该往哪个方向拨，一年中哪个时间该拨，也常常引起混淆，美国人记住的顺序是：春快秋慢。



报时信号

使用帆船航行的时代，报时塔建在从港口可以看见的地方。每天一点钟，报时塔屋顶柱子上的一个大球就放下来，它掉下来的那一刻就指示精确的时间。如果港口附近无法建报时塔，一点钟就放枪报时。理论上，正午是发布报时信号的最佳时刻，但那一刻天文学家正在观察太阳，报时信号就延后一小时。很多地方还在延续这一传统，如离得很远的苏格兰的爱丁堡，每天还会放枪；澳大利亚的悉尼，每一个工作日的下午一点还会放下报时球（见上图）。

现在，世界范围内的报时信号源来自各种源头。BBC在整点以每隔一秒的六响报时信号向世界报时，第六响最长的那一刻就是准确的时间。在科罗拉多州的科林斯堡以及夏威夷，无线电台从准确度为1秒/100万年的原子钟获得时间，在2.5MHz、5.0MHz、10.0MHz、15.0MHz的频率上向世界发出连续的报时信号。它每秒一响，每分钟有语音报时，接着一响表示准确的时间。“最后一响是世界协调时13:44。”所有情况下发出的时间都是格林尼治标准时间，它已经被接受为世界标准时间。科林斯堡（电台代码WWV）和夏威夷（电台代码WWVH）使用的是同一个频率，科罗拉多州用男声、夏威夷用女声来报时。

闰秒

格林尼治标准时间是世界协调时的基础，1972年1月1日起，它与国际原子时（international atomic time，IAT）联系起来，后者由一个原子钟来计时。人们相信世界协调时走时均匀，但后来出现的更加精准的设备表明，情况并非如此。由于潮汐、风、季节等的变化，一天的平均长短在约一毫秒内波动；由于潮汐摩擦，一天的平均长短在一个世纪会增加约两毫秒。今天人们使用国际原子时作为时间参照，前面提到地球自转也不规律，这就导致多年后这两种时间不协调，格林尼治标准时间与国际原子时需要通过修正格林尼治标准时间来定期重新校准。国际时间局[11]选定某一天，增加或减少称作“闰秒”的一秒。1989年的最后一分钟延长至61秒，世界范围内主要计时中心在当年的新年前夜的格林尼治标准时间午夜同时进行了调整，以BBC为例，发布的是7响的报时信号，而不是通常的6响，这就把多余的一秒包括进去了。

一天的测量

图4—5是地球绕太阳公转的平面视图（不按比例）。如果地球不绕太阳运转而静止不动，太阳转一天恰好360°，又回到A点正上方。然而，地球绕着太阳公转，地球转一天稍稍大于360°，如图上阴影部分的角度（实际上约361°），这样，太阳才会再次照到A点的正上方。对一天的测量不仅仅取决于地球绕着自己的轴自转，还取决于地球绕着太阳公转，后者被认为是恒定不变的。实际上，地球绕太阳转动的速度有变化，一天的实际长短通常为24小时加或减几分钟。一年中每一天的平均长度为24小时。天文学家观测太阳，获得某一天相对于太阳的正午时

间，这就需要修正所观测的时间，将其转换为基于24小时的平均时间。这种修正与两个因素有关，一是地球的自转轴与绕太阳公转轨道平面的夹角，二是地球绕太阳轨道公转的变速。通常，它以“时差”方程进行修正。

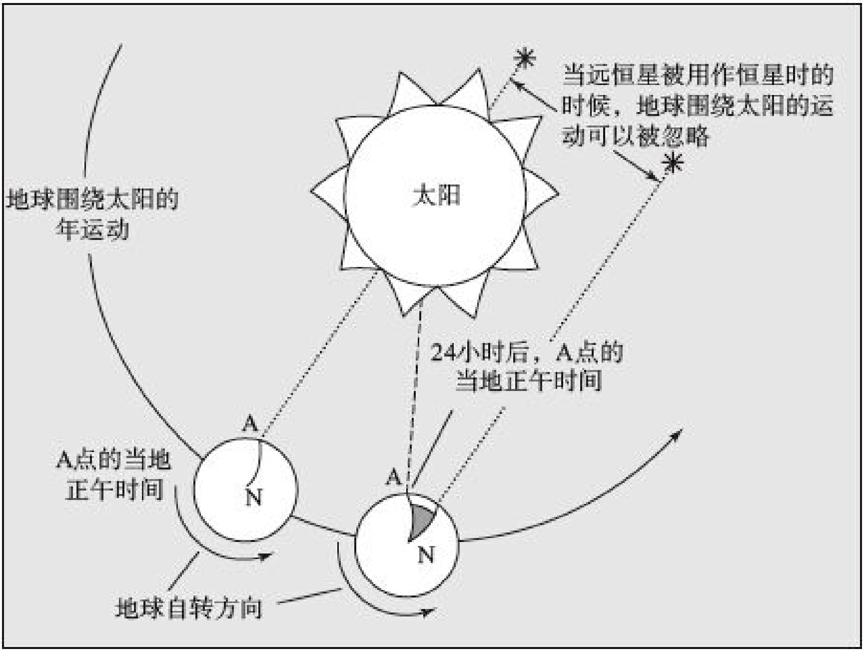


图4—5 地球绕太阳公转的轨道平面

恒星时

如果把一颗星作为基准来观察地球的转动，地球距离这颗星的距离若足够远（离最近的星星的距离也超过4光年），就可忽略地球绕太阳的运转，可把地球看作在一个静止的位置转动。这种情况下，相对于这颗星而言，地球转动一周恰好转动360°，相对于这颗星，一天的时间测算为23小时56分04秒。相对于这颗星的时间称为恒星时，天文学家将其作为基准时间。

一年

历年的平均长度为365.242　5天，一般认为是365天，把365天作为标准的一年，把余下的加到闰年上（比如，能被4整除的年份）。每一年365天，余下的一小部分少于1/4天，每一个世纪按照标准的365天/年将其作为修正值，能被400整除的就称作闰年。1900年（能被4整除）不算做闰年，2000年则是闰年（能被400整除）。

季节

地球像个巨大的陀螺在转动，也就具有陀螺的属性，地球绕太阳轨道转动，但转动轴在空间位置不变。事实上，地球24小时转动360°，赤

道上地球的表面转动速度刚好超过1 000海里/小时。两极地区有效半径减小，从赤道到两极的转动速度也在减小，这也就是为什么航天飞机要从赤道附近发射，较高的表面速度有助于把宇宙飞船抛离地球，脱离引力场的影响。

在北方的夏季，北半球向着太阳倾斜，地面受热更加均匀，冬季则相反。南半球，季节与北半球相反，但夏至与冬至、春分与秋分是基于北半球的季节来划定的（见图4—6）。

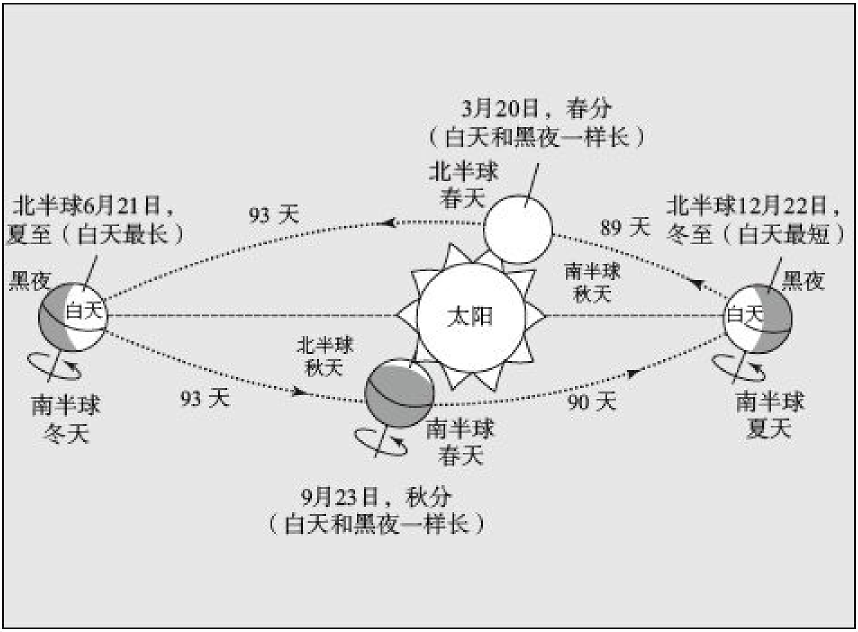


图4—6 季节

赤道平面与地球绕太阳运行的轨道平面成23度夹角。因此，一年时间内（即转动一周）太阳好像从北纬23°移向南纬23°。太阳位于最北边时，大致在6月21日，这就是夏至，白天最长，北纬23°称为北回归线。太阳位于最南边时，大致在12月22日，这就是冬至，白天最短，南纬23°称为南回归线。南北回归线之间的地区，太阳在上空照射的时间更多，太阳的热效率最高。当然，这一地区就称作热带地区。太阳从南向北穿过赤道，大致在3月20日，这一天称作春分；9月23日左右，太阳向相反的方向移动，这一天就叫秋分。

一天的长短

冬至白天最短，是因为北半球向夜晚倾斜，导致北极冬季几个月处于极夜。在夏至，北半球向白天倾斜，白天最长，导致北极夏季几个月处于极昼。南半球则相反。

北极圈

北极圈指夏季处于极昼、冬季处于极夜的北极地区。北极圈的纬度为北纬（90°–23.5°）＝66.5°。同样，南极圈为南纬66.5°。

时差综合征

欧洲仲夏时节，某些牡蛎总是在满月或新月涨潮期间产卵。如果把这些牡蛎在同一时间运到世界另一端的相似环境，就会引起它们的混乱，因为潮汐模式不同会扰乱产卵过程。在这个混乱期间，就可以说牡蛎得了时差综合征。

打断人的生活规律，身体也会出现混乱，这需要7～10天来克服时差综合征，时间长短取决于时差大小与乘客的身体状况。人的身体通常能轻松应付3～4小时的时差，超过5小时就会出现问题。人的身体适应了称作生理节律的24小时模式。该节律在一天中以恰当的时间传递所要求的信号来警告身体：饿了表示进食的时间，醒了表示起床时间等。夜间是身体正常休息的时间，各项生理活动放慢。当人快速从一个时区向另一个时区移动时，就需要一段时间调整生理节律，以适应新的时差，这就会经历时差综合征。

向西飞行，比如从伦敦到纽约，有5个小时的时差，纽约比伦敦慢5个小时。纽约时间的晚上8点，是伦敦时间凌晨1点，从纽约到伦敦，人的身体就会感到疲倦。为了把时差限定在合理的时间范围内，最好在纽约时间靠近正常的睡觉时间时再休息。如果你在纽约时间晚上10点左右睡觉，那时是伦敦时间早上3点，身体就会非常疲倦，但如果有机会一直睡到第二天早上七八点，则可以相对无痛苦地调节适应当地时间。

向东飞行就没那么简单。比如，从伦敦到德里，德里比伦敦早5个半小时，按德里时间在正常睡觉时间休息则没那么容易，那时还是伦敦的下午，难以入睡。最好在疲倦的时候睡晚一点，即使只睡了几个小时，也要强迫自己在正常时间起床。第一天你可能会有时差综合征，当天晚上你就能够在正常时间睡觉，第二天就能合理地调节到当地时间了。

如果是从世界的一端飞到另一端，问题就复杂了。你在饥饿的早上很早就醒了，生理节律发出的是傍晚的信号，是吃晚饭的时间。在白天，生理节律认为是晚上，身体的机能放缓。旅客就会感到身体虚弱，头脑迷糊，有时还有点头昏。

一个人如何应付时差综合征，受很多不同的因素影响。对这个问题还没有有效的快速解决办法。时差综合征的作用还取决于一个人到达目的地时的身体状况：身体越强健、越健康的人，越容易克服时差综合征。身体健康的年轻人更容易克服时差综合征。乘客吃东西要细嚼慢咽；少喝或不喝酒精类饮料（可适度喝点葡萄酒）；补充大量的各种液体（不要大量饮用一种饮料）；不抽烟；困了才睡；稍做些锻炼，如在飞机上慢走或在座位上做一些坐姿练习，这些都对克服时差综合征有帮助。但通宵飞行会扰乱所有人的身体系统。

据说，性爱、药物、饮酒会有助于克服时差综合征。对大多数旅客而言，最后一项更容易做到，到达后喝点酒可以让你清醒或昏睡，这确实没有什么害处。一般而言，最好的解决办法是在最初的两三天尽可能无痛苦地调节适应当地时间，向西飞睡晚点，向东飞则强迫自己早上起来，若从世界的一端飞到另一端，则要做好最坏的打算等。游泳是飞行后非常好的锻炼形式。

经常旅行的人，像机组人员，要学会如何应对时差综合征，而不是找到更容易的办法去克服它。“飞行时限”等法律一直用来把执勤限定在合理的时间范围内，确保有充足的休息时间，即便需要执勤，也要尽可能减轻相关人员的疲劳程度。正常情况下，飞行员在驾驶舱里对有些东西要检查两遍，遇到时差综合征，必要时则需要检查多遍以确保程序不出错。他们知道自己并不能像往常那样有效地工作，本能地要求自己更加小心。商人也面临同样的问题，经历较大时差后，建议至少一两天内不要作出重大的决策。

有人研究过使用一种叫作褪黑激素的神经荷尔蒙药物，它在人体内自然生成，在脑的中部由一个名叫松果体的器官产生，对光很敏感。夜间，松果体会产生大量的这种物质，白天却很少。通过对长途飞行、经历较大时差的乘客的试验，证明有控制地使用褪黑激素，的确有助于减轻时差综合征。

航 图

航图的种类

航路图包括大量的详细信息，如机场、无线电信标、通信频率等，飞行员用它来检查飞行的进程，可用于长距离飞行、航路飞行，以及机场本场区域进近或起飞阶段等。

航图要求

在平面上把地球描绘出来不可能不失真，所有的平面图都会遇到这样的矛盾。要在航图上描绘地球形状，也就意味着在平面图上展示的地球的细节中失真的数量与类型是已知的。飞行员和领航员对航图的基本要求很相似，航图上所有点的角度和方位线要表示正确。基于这种属性而设计的航图，就称为共形或正形。这种情形只有经线与平行的纬线以合适的角度相交时才能实现，任何一点比例的变动，都会引起其他方向以相同的比例变动。

航图制作

想象有一光源位于透明的地球内部，地球的细节用阴影投射到地球表面的一张纸上，这就能演示几何图投影。为了能够记录投影，这种纸可以是平面屏幕、围绕地球的圆柱物，或者像尖顶帽子一样位于地球上方的一个圆锥体——把这个圆柱或圆锥展开就是平面图。

世界有三个地区在平面上描绘地球表面会遇到困难：赤道地区、中纬度地区和极地。在赤道地区，子午线几乎相互平行；在中纬度地区，子午线又相互倾斜；极地的子午线则像车轮的辐条向外辐射（见图4—7）。人们采取了多种不同投射方法来解决每一个地区的问题，有三种最常用的方法，取名墨卡托几何圆柱投影、兰伯特正形圆锥投影与极球面投影。

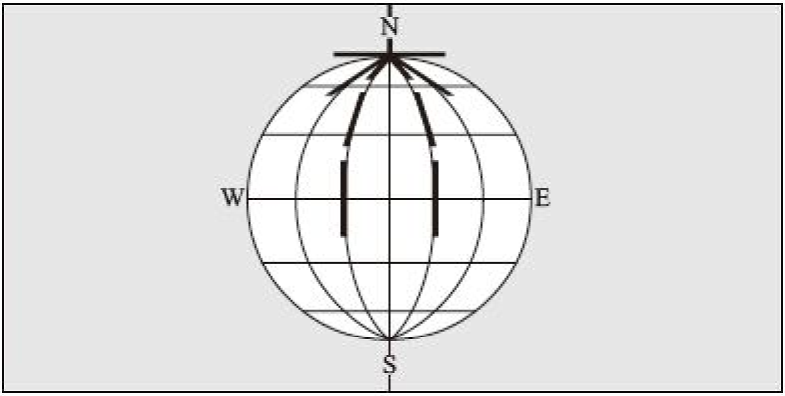


图4—7 子午线汇聚

墨卡托几何圆柱投影

1569年，墨卡托绘制了沿罗盘方位线领航的航图。这是最早的正形投影，直接而又准确地描绘出了真方位，在图上用直线画出了罗盘方位线。由于子午线都是平行绘制的，只有在赤道地区才能正确描绘地球。纬度增大，比例也变大，导致地球形状扩大。用墨卡托投影绘制的世界地图，会导致航图失真，比如，格陵兰岛在地图上就显得比在地球上大得多。墨卡托航图通常在低纬度更有用。

兰伯特正形圆锥投影

著名的地图学家兰伯特后来采取了另一种投影，航图上用直线来绘制大圆弧。仅在两条所选择的，称作标准纬线的纬线处才能正确地描绘地球。这种航图通常用在中纬度地区，那里的投影更准确地描绘了地球的形状（见图4—8）。

极地球面投影

采用这种投影，大圆弧还是画为直线。只有极地地区才是对地球的正确描绘。这种航图用于极地领航与穿越极地的飞行。

比例

导航图上，以1海里为单位，等于纬度的1分。航图上任何一点的数值范围以子午线上靠近该点的纬度的分度来表示。两点之间的距离则由两脚规来测量，再根据该点附近的子午线来认读。

航图的准确性

早期的航图非常不准确，绘制得也很粗糙，所绘制的岛屿，甚至某个地方很大的大陆块，往往找不到。比如，在荷兰人探险之前，很多人相信，从中国和东印度群岛到美洲大陆有大片的海洋，即现在的太平洋。这样大片的海洋怎么会没有陆地出现，这让早期的航图绘制人非常费解。在早期的航图上，就在南太平洋中绘制了一大块想象的陆地的粗略轮廓，并写上“terra incognita australis”——南部未知的陆地。当然，人们最终在南部发现了这块大陆，荷兰人将其取名为“新荷兰”，后来英国人根据上面的文字命名为“澳大利亚”。这块新发现的大陆，与早期航图上的轮廓一点也不像。

如今航图绘制是一门精密的科学，甚至在当前的航图上，尤其是极地地区和大陆偏远的地区，还能发现航图的某些区域标识着“图上未标明”或“未测量”，这一点也不奇怪。

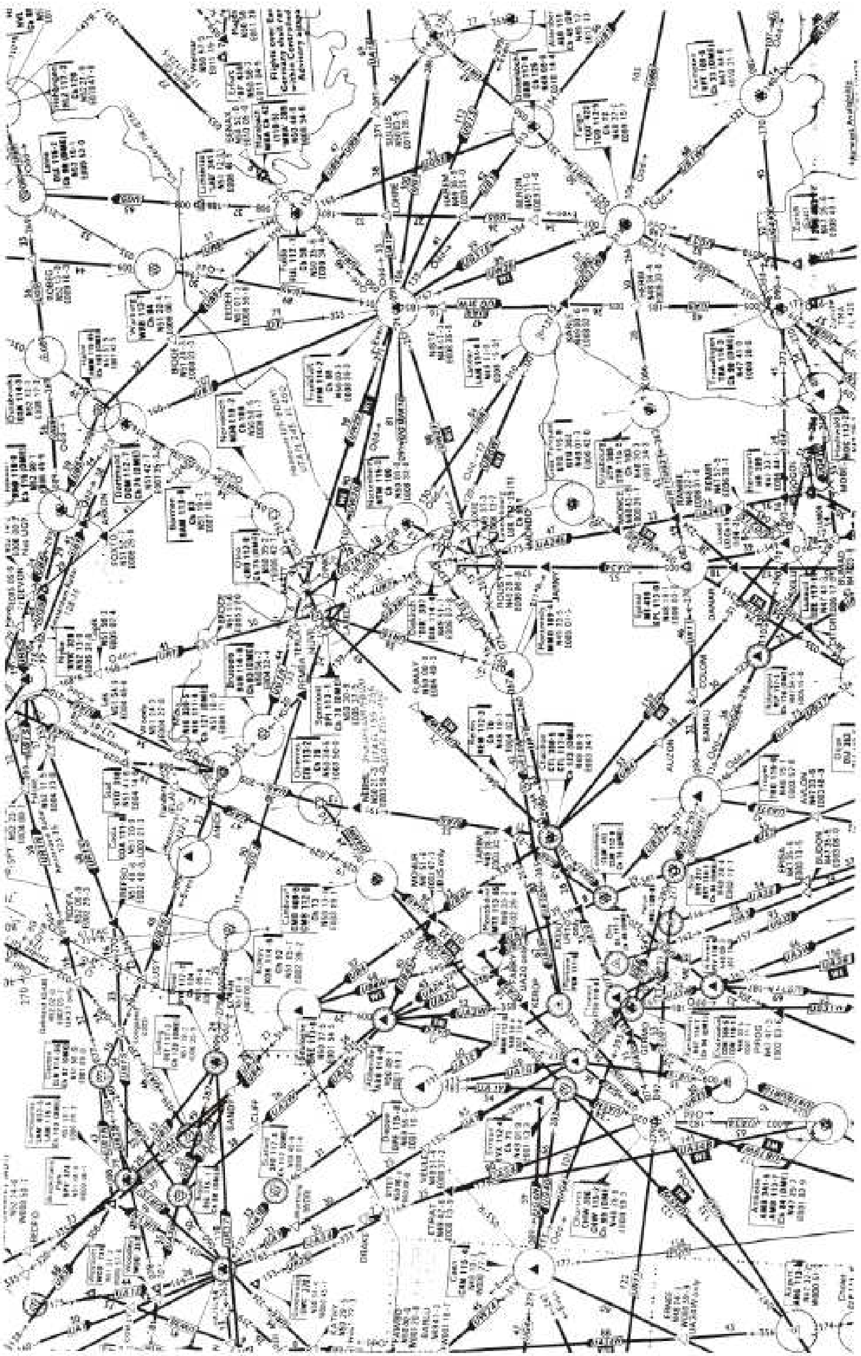


图4—8 欧洲航路图，采用兰伯特正形圆锥投影（感谢AERAD提供）

[1] 腓尼基人是历史上的古老民族，公元前10～前8世纪生活在地中海东岸，是古代著名的航海家。库克船长（Captain James Cook，1728—1779），英国皇家海军军官、航海家、探险家和制图师。——译者注

[2] 20世纪七八十年代之前，大型客机驾驶舱几乎都是五人制机组。正、副驾驶，领航，机械和报务。波音737、757、767问世后就改变为二人制机组。——译者注

[3] 中部非洲的特产，即棕榈树乳白色的汁液，风味奇特。——译者注

[4] 位于西班牙最南部和非洲西北部之间，是沟通地中海与大西洋的海峡，长58千米，最窄处仅13千米。——译者注

[5] 位于北大西洋中东部的火山群岛，绵延640多千米，由9个火山岛组成。——译者注

[6] 是指太阳日出和日落从北偏东的角度，其数值因地区纬度不同而不同。——译者注

[7] 指地球两点之间与经线处处保持角度相等的曲线，也叫等角航线。距离长时，它长于大圆航线。——译者注

[8] 16世纪地图制造学家，1512年出生于荷兰，1568年制成航海地图“世界平面图”。——译者注

[9] 位于英国伦敦东南，泰晤士河南岸。1675—1948设皇家天文台。1884年华盛顿召开的国际经度会议确定经过它的经线为本初子午线。1997年被列入“世界遗产名录”。——译者注

[10] 英国西南部重要港口城市，威尔士地区首府，20世纪初全球最大的煤炭输出港。——译者注

[11] 1912年成立，总部设在巴黎，主要任务是收集和处理全球各天文台测量的数据，提供精确的世界时和地极坐标值。——译者注

05

飞行领航

现在，在所有大型飞机驾驶舱中，计算机领航已经是标准配置。这些尖端设备可以轻松地引导飞机沿着航路飞越沙漠、穿过海洋。飞机不再要求使用传统导航方式，但飞行员如果不能全面掌握导航原则与基本的导航规则，就无法安全地操作并监控机载计算机设备。为了帮助读者理解导航，本章将介绍一些基本的导航知识，并简略介绍一下过去飞行领航员的职责。下面先简要介绍一些定义、度量与单位。

简单定义

赤道。赤道是地球上一条假想的线，沿东西方向把地球分为南北两半。赤道是测量纬度的基准线。

本初子午线。子午线是地球表面一条假想的线，沿南北方向把北极和南极连接起来。穿过某一点的子午线，通过这一点连接北极和南极，就像穿过格林尼治的本初子午线。本初子午线是测量经度的基准线。

等角线。等角线指与所有子午线保持角度相等的一条线。

大圆线。大圆线是地球表面假想的一个圆，圆心为地球的中心。地球表面两点之间的最短距离，就是经过这两点的大圆弧。赤道就是大圆线的一个例子，本初子午线就是半个大圆线。

纬度。某一点的纬度就是这个点在赤道以南或以北角度的垂直位移，从地心开始测量，范围为0°~90°。纬度以度（°）和分（'）来表示，1度等于60分。

经度。一个位置的经度是该点在本初子午线以东或以西角度的水平位移，从地心开始测量，范围为0°~180°。经度也以度和分来表示，1度为60分。纽约肯尼迪机场的确切位置是北纬40°38.9′，西经73°46.9′（见图5—1）。

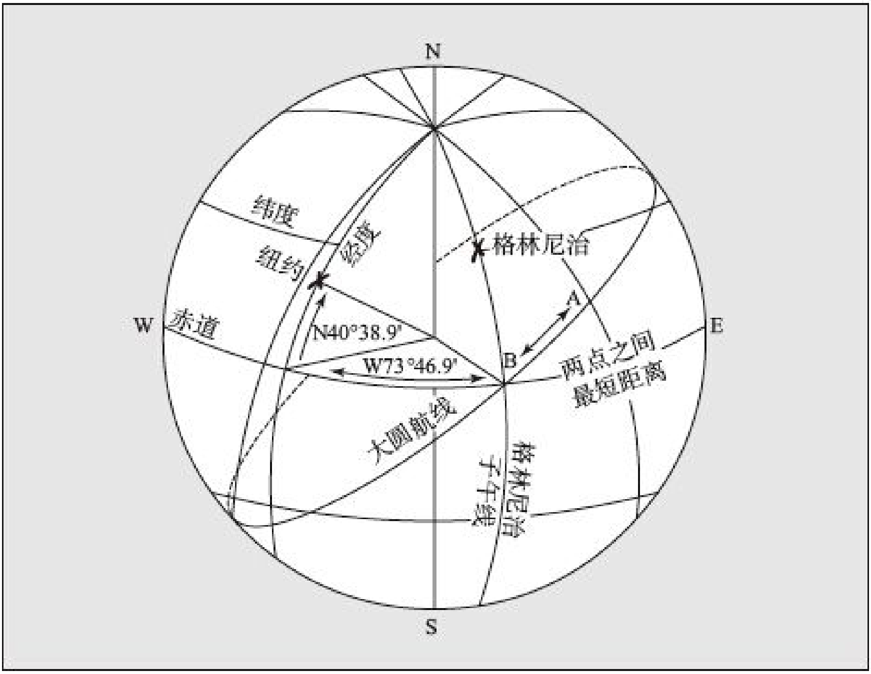


图5—1 纬度、经度和大圆航线

度 量

方位。方位指一个点相对于另一个点的方向（见图5—2）。

航向。飞机的航向是机头所指的方向。

航迹。航迹指飞机经过地面上的实际飞行路线。

偏流。偏流指的是航向与航迹之间因为风需要修正的角度。

方向。方位、航向、航迹、风的方向都是从正北顺时针测量的度数，用三位数一组从000°到360°表示。正北为000°或360°，正东为090°，正南180°，正西270°。真北（N_T）指地理的北极方向，从真北开始测量的度数，表示为真（°T）。磁北（N_M）指受地球磁场影响由转动的磁针所指的方向，从磁北开始测量的度数，表示为磁（°M）。磁北极每一年的运动都在放慢，现在位于加拿大的巴瑟斯特岛，距真北1 000海里。50亿年前，磁北极位于东太平洋。

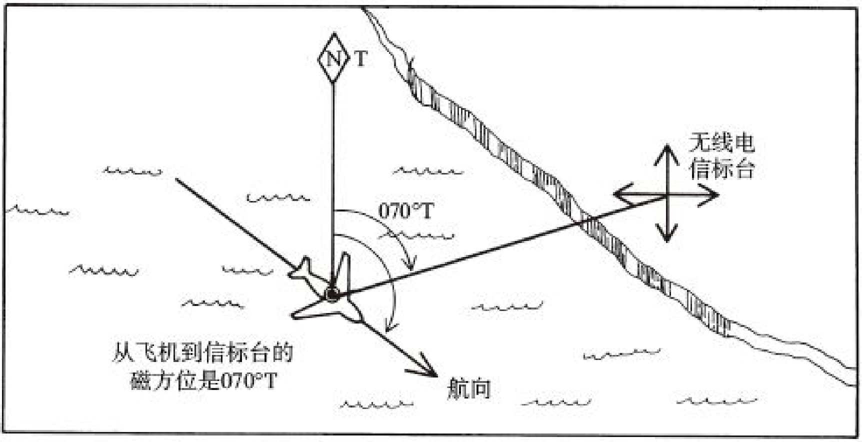


图5—2 方位

磁差。磁差指真北与磁北之间的角度差，顾名思义，世界各地磁差的值不同。用短线把航图上磁差相等的各点连起来就称为等磁差线。人们感受到的磁差取决于观察者与真北和磁北的相对位置，磁北位于真北以东叫磁差偏东，磁北位于真北以西叫磁差偏西。

罗差。罗差指出现强磁材料与电路时，如正在运行的无线电设备，影响到机载设备的本地磁场，罗盘受到影响而使指针偏离磁北。罗盘非真实的指北称作罗北（N_c），罗盘测量的方向以度数表示为罗方向（℃）。罗差就是磁北与罗北的角度差，罗北位于磁北以东叫罗差偏东，罗北位于磁北以西叫罗差偏西。设计罗盘时会将罗差保持在最小范围，这个过程叫测罗差。剩余罗差则制成罗差表供各地罗盘使用，飞机上放置有罗差修正表。

航图的子午线指向真北，测量的是真方向的度数。因此，航图方向要用磁差转换为磁方向，磁方向要用罗差转换为罗方向。比如，航图上量的真航向，要领航到远处某一点，需要用罗盘修正才能操纵。真航向（°　T）±磁差（V）＝磁航向（°M）±罗差（D）＝罗航向（℃）（这样更好记：真磁磁罗罗）。同样，罗方位需要修正并在航图上标绘出来，如距远处的无线电信标台。罗方位（℃）±罗差（D）＝磁方位（°M）±磁差（V）＝真方位（°T）（这样更好记：罗罗磁磁真）。

单 位

海里。1海里（n.m.）等于地球表面子午线1分所对应的弧长，即1海里等于纬度的1分。事实上，地球是个扁球体，上下两端稍扁。南极和北极的1分弧长与赤道的1分弧长不一样，1分弧长的平均长度为6 080英尺，这个平均长度就是海里的实际长度。（事实上，极地的直径仅比赤道的直径少27海里左右。在大多数领航时，地球可以看作是一个正

球。）

法定英里。1法定英里（s.m.）等于5 280英尺，合1 609米。

千米。1千米等于赤道子午线穿过巴黎到北极距离的1/10 000，等于3 280英尺，合1 000米。

速度。速度以节来表示，1节等于1海里/小时。地速（ground speed，G/S）指飞机相对于地面的速度。真空速指飞机飞行时相对于周围空气的运动速度。

风矢量。风矢量（wind velocity，W/ V）包括方向和风速。方向总是指风的来向。风矢量的表述，如090/20，指风从090°吹来（正东），速度20节。通常，方向表示的是高空风与预报的地面风的真方向，地面实际风则用磁方向。风顺时针运动则叫向前，逆时针运动则叫向后。

领航技术

基本领航：推测领航与无风领航

为更好理解上面的术语，这里通过它们的实际应用来解释。领航（通过领航员在航图上标定位置）的基本原则就是保持估算的位置，借助这一原则与可用设备，可精确地找到称作定位点的一个位置。过去通过简单推导的方法，知道飞机的大概位置，简称推测领航（deduced reckoning，简称为ded.　reckoning），所有领航员将其拼读为“dead” reckoning。使用航向与真空速，在假设没有风的情况下来推算飞机在整个飞行过程中的位置，叫无风领航。任何时候利用预报的风矢量，可确立飞机的预计位置或推测位置。图5—3概述了这个过程。

飞机从机场上空A点出发，保持航向090°　T，受风的影响会发生偏离，地面上的航迹与飞机的航向有差别。换句话说，飞机稍稍以横向的方式掠过地面航迹。如果沿飞机航向在航图上画一条线，如航向090° T，一小时后，用飞机的真空速与航图的比例尺，在无风的情况下就可确定飞机的位置B点，并在飞机航向矢量线上标出来。A到B的距离表示以海里/小时（节）的飞机真空速所飞的距离。

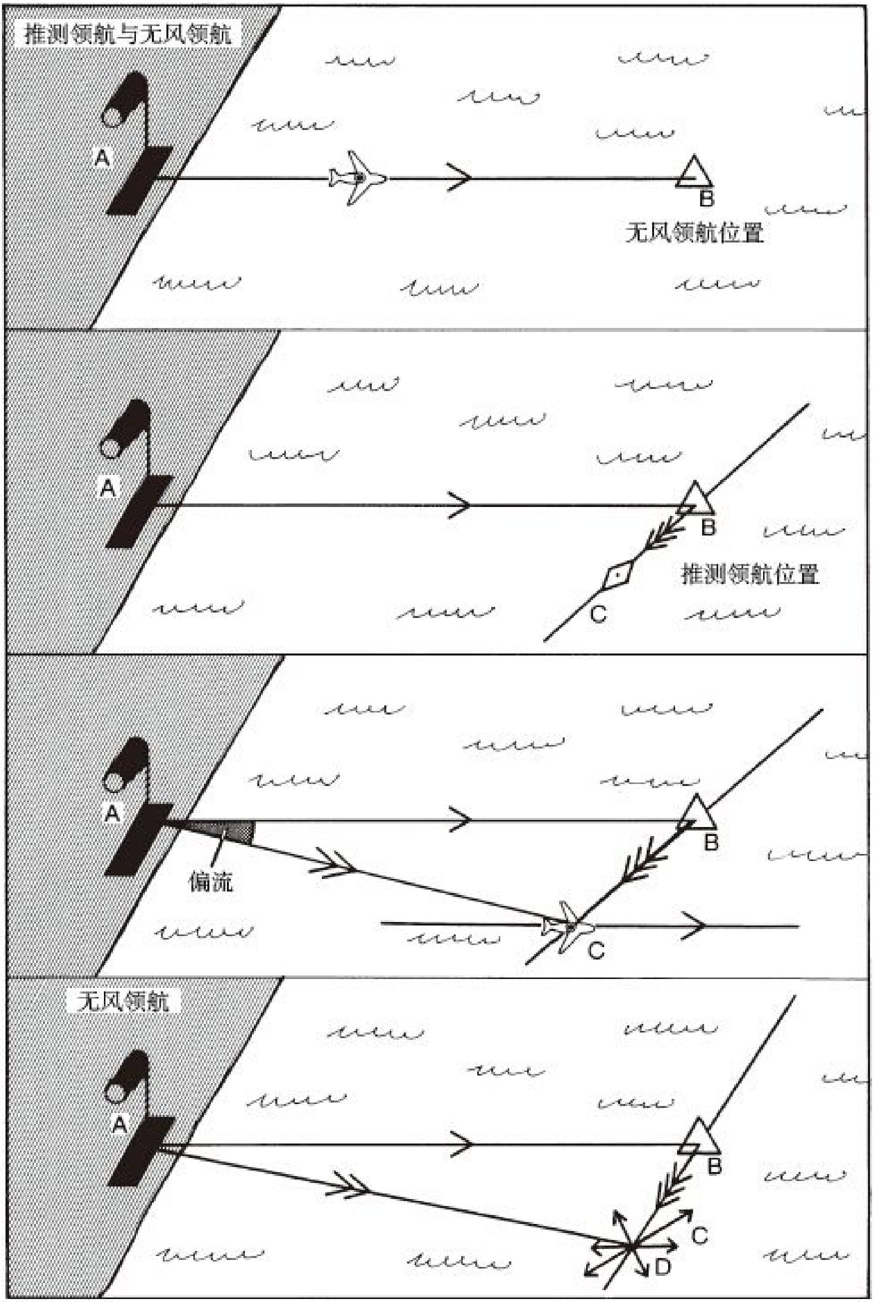


图5—3 推测领航与无风领航

现在B点有预报风可用，如045°/50节，按照比例，B到C的连线表示来自045° T、50节的风所吹过的距离。C点就是一小时后推测领航确定的位置。由于我们假设的是过去一小时风依然保持准确的045° T/50，而实际中很少出现这种情况，所以C点也不是飞机的准确位置。A到C的距离测量的飞机的预计地速，A线与C线的方向，假设095° T，就是飞机在

地面预计的航迹。阴影部分的角度表示飞机预计的偏流角，向右偏5°。

ABC点所构成的三角形称作矢量三角形，已知任何两个矢量，就可按比例在航图或坐标纸上画出这个矢量三角形，获得第三个矢量。如果同时依靠一个独立信源定位点，确定飞机的位置在D点，那么矢量A–D就是自A点开始的实际地速与航迹，矢量B–D是遇到的实际风。这样的计算结果就可用于下一航段航向与速度的修正。

使用多普勒后，无风领航程序就多余了。多普勒是一套独立的机载导航辅助设备，安装在飞机腹部，通过一套天线系统向地面发射无线电信号。信号从地面反射回来，在所接收信号中探测出频移，就能确定实际地速与偏流。有了这些信息，从曲线表就能轻易获得真空速，任何时候领航员只需使用计算尺就可算出风，这是今天按键式计算机的鼻祖，实际上是在计算尺网格上加了罗盘刻度盘，可显示真空速和偏流线。在有刻度的网格上标出矢量三角形相应的区域，转动罗盘刻度盘就能获得这些信息，而无需把这个三角形按比例拿到航图上去。它的背面是圆形计算尺，可用于各种算数与航空计算。图5—4展示了这个工具的两个面。

标准领航

标准领航系统使用墨卡托航图，用真北标图，通过磁罗盘保持飞机预定航向。最初使用墨卡托航图是为了简化领航。保持恒定的磁航向（假设磁差与风不变），其结果是沿等角线的航迹飞行，在这种图上可直接将其标绘为真方向的一条直线。子午线的投影相互平行，标绘真方向也较为容易。等角线航迹要比大圆航迹长些，由于该系统用于低纬度地区，这种差异极小。

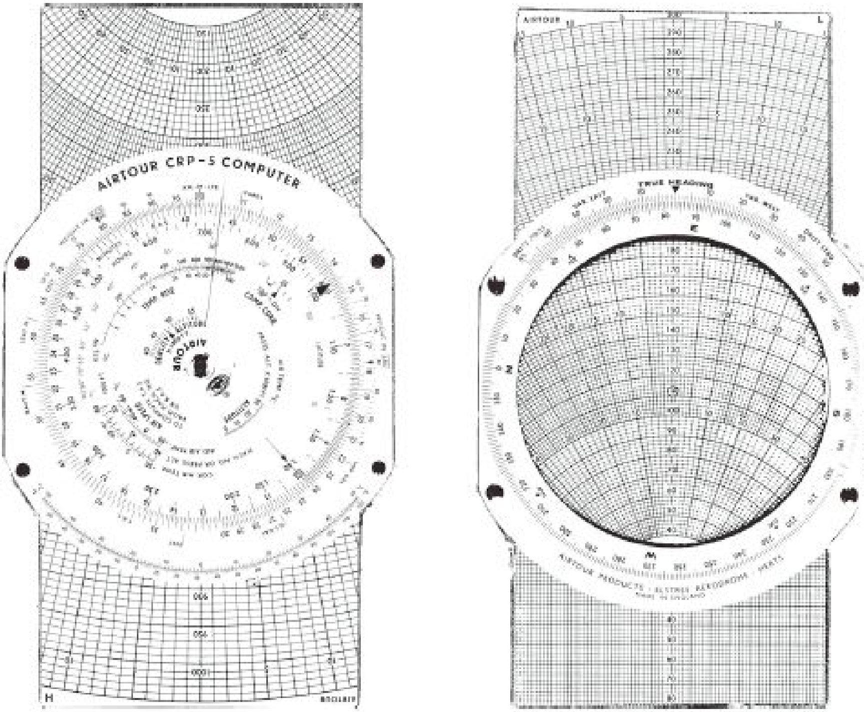


图5—4 领航计算尺

网格领航

在高纬度地区，由于比例尺扩展很快且无法显示两极，基于墨卡托投影的航图就失效了。在中纬度地区和极地，领航要使用兰伯特的正形和极地球面投影航图。

在这种航图上，子午线相互不平行，而是更多指向两极，就像在地球表面上一样。航图上会用直线标出大圆航迹，以不同角度与子午线相交。使用标准领航技术保持大圆航迹，中纬度地区飞行在航路上需要不断改变用真方向表示的航向，靠近两极需要更快地改变航向。利用网格领航系统就解决了这个问题。

在航图上加上任意的网格，网格所指的方向叫网格北（N_G），作为方位标绘的基准，表示为网格度（°G）。为了方便起见，通常选取本初子午线作为网格北，网格子午线就直接加在航图上，每一条都与网格北平行（见图5—5）。用这种方式，大圆航迹与真子午线形成不同夹角，而与所有网格子午线形成相同夹角。飞机的航向表示为相对于网格北的角度，使用这种恒定的网格航向可使飞机靠近大圆航迹。

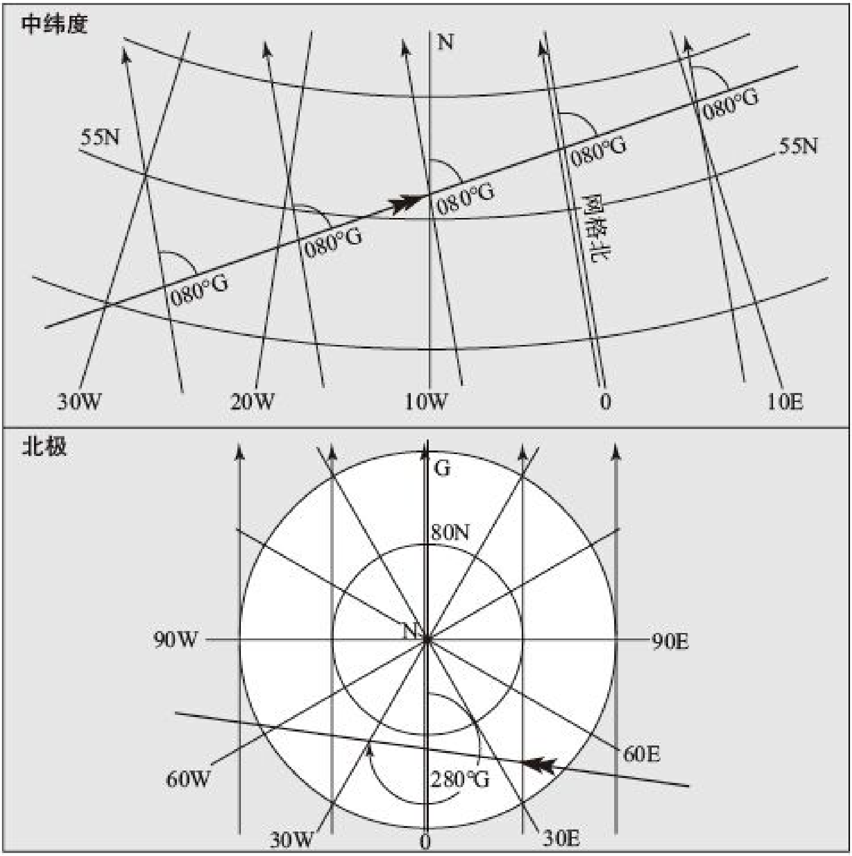


图5—5 网格领航

中纬度的网格领航

比如，在北半球，兰伯特正形投影图添印了基本的网格，可用来飞大圆航迹。无线电信号也沿大圆路径传播，无线电范围可直接在航图上用直线标绘出来。既然这样，使用正常的磁罗盘来保持预定的航迹，就需要把网格航向转换为磁航向。

航图上任意一点真北与网格北的角度差，叫网格汇聚角。使用网格汇聚角把网格方向转换为真方向，使用磁差把真方向转换为磁方向。网格汇聚角与磁差用代数的方法加在一起，作为一个修正量，称作网格差。相同网格差的点用虚点线在航图上连起来称作等网格差线。通过计算所需的网格航向来保持航迹，从航图上获得沿航迹的平均网格差，用它来飞出恒定的指示磁航向，利用磁罗盘就可操纵飞机尽可能靠近大圆航迹。

两极上空的网格领航

极地领航，通常使用极地球面投影图。与兰伯特航图一样，大圆航迹与无线电方位可标绘为直线。同样，通常选取本初子午线作为网格北

的基准线。极地地区由于靠近磁极，磁罗盘不可靠，只能在陀螺模式下使用罗盘。在这种模式下，由陀螺稳定的罗盘（不受磁力的影响）设计成罗北与网格北一致，并按照地球的自转校正了罗盘。沿恒定的网格航向操纵飞机，就可保持大圆航迹。

在飞机的位置用网格北校对罗盘时，或把高空风从真方向转换为网格方向、把无线电方位从磁方向转换为网格方向时，要格外小心。除了领航员把罗盘设置成网格北的任意一个基准线之外，飞行员没有其他参照来操纵飞机，航向或校对的小失误也会造成严重问题。

定位

通常用三点位置线就可准确定位。如果出现一个叫“三角帽”的小三角形，通常就认为其位置位于三角形的中心。要同时获得三条位置线几乎不可能，所以有一条位置线往往要沿着计划的航迹去找，以飞机的地速飞一段时间后就到达所要求的定位点。要花几分钟时间才找到定位点，记录下时间，并与所标绘的每一个位置线对照检查，也要与最后定位点对照检查。

在无线电信标的范围内，如跨洋开始与结束时，从方位线与测距仪可获得准确的定位点。也可倾转气象雷达来绘制地球的地面图，然后根据航图上的海岬或岛屿来识别。最后记下屏幕上所标注的距离与相对方位线，就可获得定位点。

在大洋或沙漠上空飞行，就需要远距离无线电辅助设备，罗兰（远程导航）是最普通的位置线来源，尤其在飞越大西洋与太平洋时。

罗兰根据主台与辅助电台发射的无线电信号的时间差来确定位置线。使用航图上叠印的双曲线位置线来标绘位置。海洋上空也可使用康索尔系统，它从远处电台发射出由虚点和破折线构成的信号模式。通过推测领航一旦建立相应的康索尔扇区，通过虚点和破折线的计数，根据航图上叠印的康索尔量表就可确立位置线。北大西洋上空，也可使用海洋船站（ocean station vessel，OSV），它们的网格位置由摩尔斯电码来指示。一旦建立了无线电联络，就可从机上报务员那里获得雷达方位线。

大部分沙漠上方和部分海洋中间，上述辅助手段都不可用，领航员不得不依靠星星求助天文导航来定位。

与在船上观测不同，地平线不符合航空使用要求。不管怎样，即使地平线可用，飞机也不可能等到黄昏或黎明——那时才可看见星星与地平线。相反，将一个水准器放置在两条平行线之间的六分仪内，把六分仪校对到垂直位置，由于飞机运动会导致水准器位移，垂直位置并不一定是真的，还需要修正。

同样与海上使用不同的是，由于看不见头上的天空，需要预先设置好六分仪，通过计算找到需要的星星。飞行领航员在看到星星并测量其精确高度之前，站在观察者的位置从图表上获得星星的大致高度（比如

地平线与星星的夹角）与方位角（即相对于真北的方向）。

六分仪（见图5—6）固定在驾驶舱顶的一个双重门增压基座上。打开第一重门让六分仪的活动臂伸进开孔，打开第二重门松开潜望镜筒伸入大气。由于存在压差，一股强力会把六分仪向上拉，要防止它向上卡在锁紧的位置。曾有一名飞行机械师自行设计了一种真空清洗软管系在六分仪的一端，另一端安装在六分仪的基座上。他的想法是在巡航时打开六分仪基座的双重门，就像使用真空吸尘器一样用软管清洁驾驶舱。第一次试用时，软管连接到六分仪基座，双重门打开，但吸力太大，整个软管翻了过来，把整个组件一起吸出去了。

根据六分仪上的修正表计算出星星的设定高度，使用六分仪活动臂上的方位环把六分仪调到星星的方位，它对准的是真北，这样就使六分仪“指向”所要求的星星。接着就可以看见星星，但最初须得明确识别六分仪视线范围内的本地星座模式，然后才可能“估计”。开始观察时，在两分多钟的时间内暂不考虑飞机本身的运动。比如在0200格林尼治标准时间观察一颗星，在0159开始瞄准，在0201结束。这期间，领航员要对六分仪稍做些调整，保持星星一直可见。观察结束，把六分仪内的读数人工加起来，获得平均的观察高度读数。

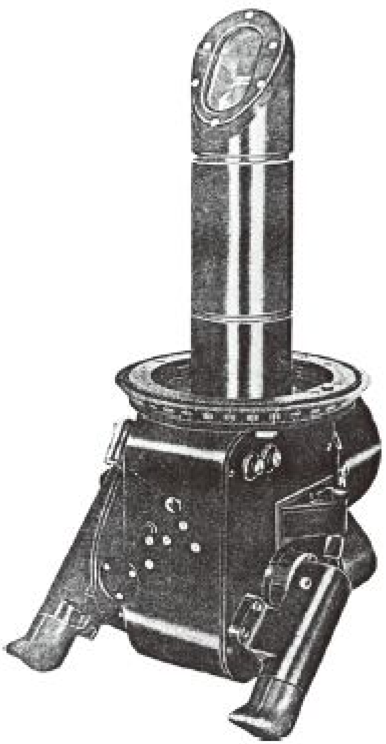


图5—6 潜望镜六分仪

比较计算的高度与观测的高度，就可获得一条位置线，然后将其标

绘在航图上。观测另外两颗星，就可标绘出另外两条位置线，这样就获得了三颗星定位的一个位置。借助星星来领航，领航员的工作负荷很大。飞机的速度很快，领航员需要快速修正任何的偏航，使飞机回到航迹上去，还要完成对天文定位点的计算，把飞行进程填入航行日志，在要求的时间估算星星。这很容易出错，所以需要时间来检查各种计算，修正错误。结果，每40分钟才能获得一个天文定位点，这段时间飞机早就飞过350多海里了。

尽管大多数定位点都是从类似的位置线获得，如罗兰、三星定位，在辅助手段极少的情况下，往往有必要使用多种来源的位置线。事实上，尽管有相对先进的设备，领航员四处寻找位置线来获得定位点也很正常，尤其是在缺乏定位点的偏远地区。有时，仅有两条或一条位置线可用。在白天，从欧洲到加勒比海远距离飞行，在低纬度地区，太阳就是唯一的位置线来源。领航员所能做的就是用太阳光线与推测领航的位置来建立“最可能的位置”。这就是20世纪70年代的事情，仅仅几十年前！

飞行员领航

只有在那些偏远的地区才要求掌握领航员的技术，沿常规的航路在人口稠密的大陆飞行时，飞行员可以通过从航路上的一个无线电信标台飞行到另一个无线电信标台来导航飞机。

今天，飞行员还在使用无线电辅助设备进行航路引导，只不过仅仅用来与计算机领航设备进行交叉检查。进近着陆时，使用无线电辅助设备可把飞机引导到接地。飞行员还需要全面掌握无线电信标的运行知识，下面会概略介绍一些所使用的无线电设备。在“玻璃座舱”[1]中呈现的无线电仪器，现在变成了由计算机在屏幕上生成的图像，下面也会展示这些仪表的显示。

无方向性信标

无方向性信标（non-directional beacon，NDB）是最简单的无线电导航辅助设备，仅由一部无线电发射机组成，在公布的频率上发射信号，与无线电广播电台没有两样。飞机上也仅由一部简单接收机来接收信号并将其转换用于导航。接收机的数字显示屏上选定所需频率，通过摩尔斯电码信号就可识别这个信标台。

无方向性信标在200～800 kHz左右的低中频段发射信号。信标的可用距离与功率的平方成正比（即可用距离翻倍，需要输出功率翻4倍），海洋上远至500海里，陆地上100～150海里。有时，无方向性信标在航路上也可用作航迹引导。更常见的是，称作导航台的低功率的无方向性信标，在机场用作最后进近的指点信标，可用距离10海里左右。

一旦调谐到无方向性信标台并识别，需要确定信号是从哪个方向发

射来的，它由飞机上称作自动定向仪的设备来实现。

自动定向仪

选定可用距离内的无方向性信标频率后，自动定向仪（automatic direction finder，ADF）会直接把指针指向信标方向。该指针叠在突起的罗盘上指示磁方位。用这种形式显示的仪表叫无线电磁指示器（radio magnetic indicator，RMI），如图5—7所示。

接收设备由带单天线的转动环构成。转动环与接收波成直角时，环的两边是同相感应，没有电流。这个位置叫“零点”，确定所接收的信号线。

不管发射来的无线电波来自转动环的前面还是后面，单天线转动就可建立信标的方向。所接收的信号放大后，操作一个小马达自动驱动这个系统，指针指向“零点”，表示信号的强度为零。无线电磁指示器上的指针就表示无方向性信标台离飞机的方向。

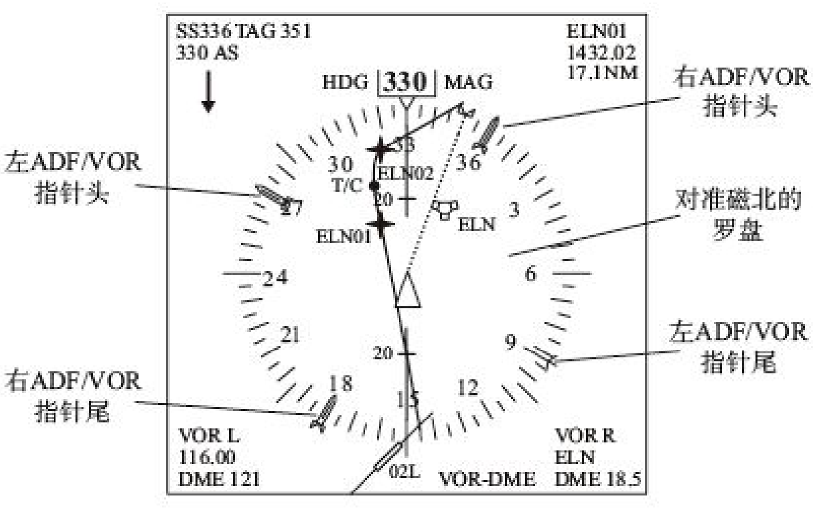


图5—7 波音777导航显示，集中地图模式显示无线电磁指示器

低频与中频频段较为拥挤，信标往往在同一个频率发射，以远离限定的输出功率来设置信标就可避免混淆。夜间，电离活动增加它的可用距离，会引起同一频率信标的相互干扰。无方向性信标也受大气条件的影响，如雷暴有时会导致不稳定的读数，自动定向仪指针立刻指向带有强电流活动的云层，而非信标台的方向。

甚高频全向信标

甚高频全向信标（very high frequency omni-directional radio range，VOR）是最普通的无线电信标。它主要用于航路上，用作航迹引导，指示报告点。顾名思义，甚高频全向信标在108.0~117.9 MHz甚高频段发射，可用距离受制于直线距离，通常为200海里。

甚高频全向信标根据比相原则来发射方位信息。它发射的是30Hz的调频，由30转/秒的天线系统发射出来。飞机上的接收机不仅接收到30Hz的调频信号，还接收到旋转天线发射出的30Hz的调幅信号。所接收的调频在所有方向上同相，但所接收的调幅则与飞机和信标台的每一个位置不同相。这两种调制（调频与调幅）设计成与信标的磁北方向同相，接收器探测到调制间的相位差对应于飞机与信标台的磁方位。



位于英格兰肯特的Detling VOR台

甚高频全向信标的调谐与识别和无方向性信标相似，但用两种方式来显示方位信息：用无线电磁指示器上的指针指向甚高频全向信标信标台，与自动定向仪的无线电磁指示器显示相同；另一个是偏离杆，也叫作航道偏离指示器，来指示偏离甚高频全向信标方位线的位置（见图5—8）。甚高频全向信标发射的无线电方位从信标台像自行车的车轮辐条一样向外辐射，每个辐条称作一条径向线。比如，无线电波束指示甚高频全向信标的磁方向为正东，就叫090°径向线（090° R）。用航道指针可选择把甚高频全向信标的径向线作为航路的中心线，在罗盘系统上显示航路预计应飞的航迹。飞机位于航路中心线，航道偏离指示器的偏离杆位于罗盘系统的中心，与所选航道指针在一条线上。这样的仪表显示即时告知飞行员飞机相对于所选径向线的位置图，与无线电磁指示器指针仅指示信标台的方向相比有了很大的改进。

特高频的发射通常不受大气条件影响，在甚高频全向信标可用范围内，信息非常准确。超出200海里的可用距离，接收不到信号时，航道偏离杆消失。

测距仪

测距仪（distance measuring equipment，DME）通常与甚高频全

向信标装在一起。它给出飞机与信标台距离非常准确的数字读数，对飞行员而言是非常重要的辅助设备。测距仪在962～1 213MHz的特高频段运行，最大可用距离约300海里。

测距仪是二次雷达的一个实例。飞机上装有一种称作询问机的无线电设备，询问机发射带有无线电能量的编码脉冲，当脉冲到达地面被称作应答机的设备，激起发射机送出应答脉冲给机载询问机接收器。用电子方式测量出发射脉冲与接收应答脉冲的时间差，就能自动计算出信标距离并显示出来。

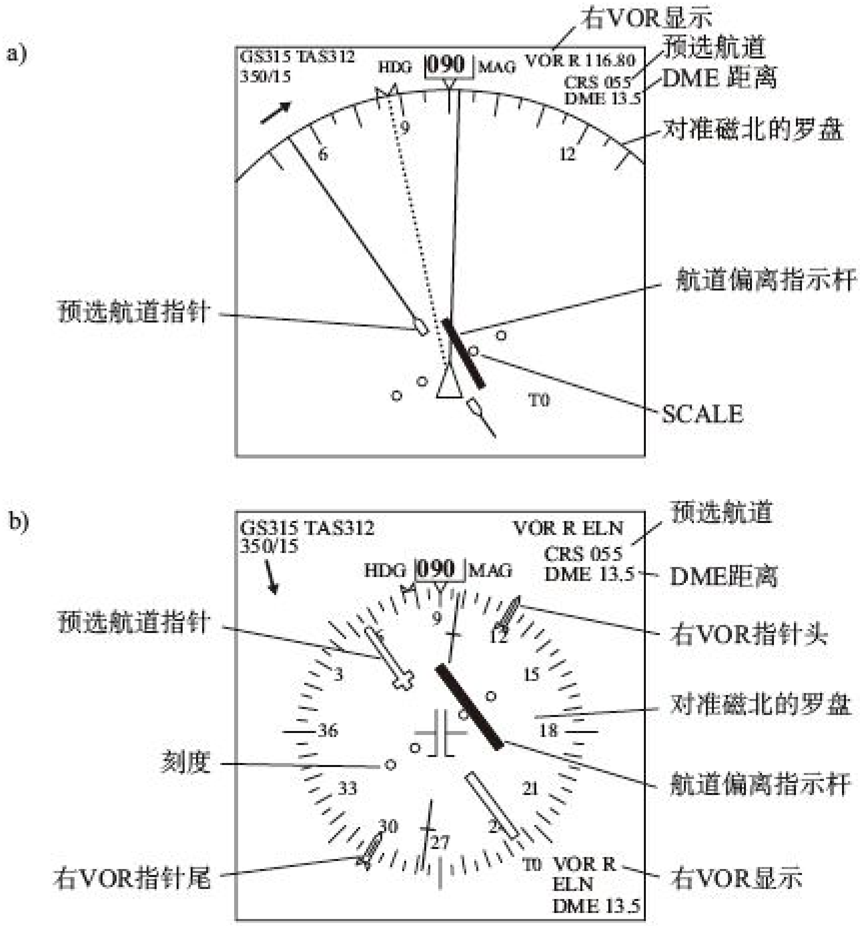
962～1 213 MHz的频段可分出252个频率，成对提供126个频道。每一个频道由两个相差63MHz的频率组成，一个用于空地询问，另一个用于地空回应。比如频道1，空地用1 025 MHz，地空用962 MHz。使用不同频率，可防止机载询问机接收到地面返回的自己发射的信号。

测距仪测量的是飞机与信标台的斜线距离，要比地面距离长一些，在50海里范围内仅长0.5海里左右。飞机在信标台正上方时误差最大，此时显示的是飞机高于地面的高度，而不是指示零，如飞行高度35 000英尺时显示6.6海里。两部测距仪同时工作可自动对计算机导航系统的位置信息进行更新。

选定并置的甚高频全向信标频率，测距仪频率就自动调谐，只要在测距仪可用范围内，就出现应飞距离（见图5—8）。

仪表着陆系统

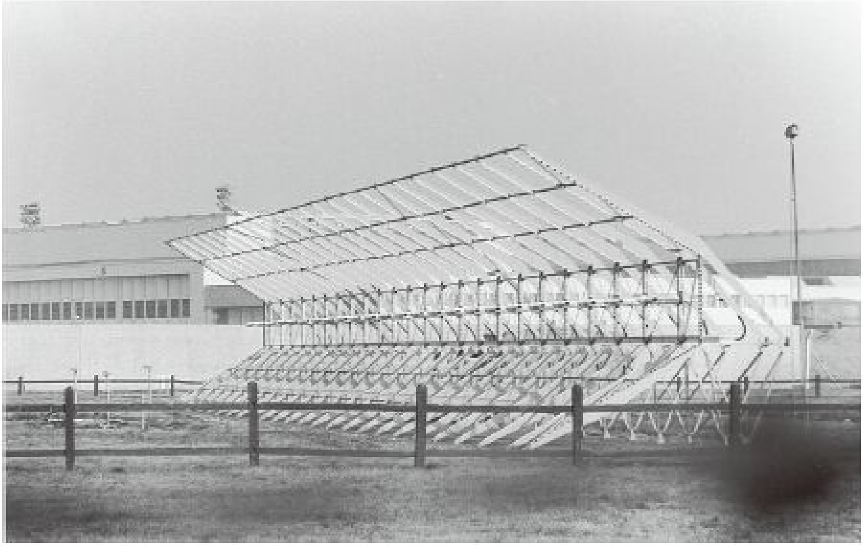
仪表着陆系统由两束独立的无线电信号组成，提供跑道中心线引导和下降剖面引导，一直到跑道接地点区域。跑道中心线信号称作航向台（localiser，LOC），下降剖面信号称作下滑台（glide slope，G/S）。（“下滑台”一词属于用词不当，飞机当然并没下滑。向任何机场进近，飞机放下起落架和襟翼时，都需要动力使飞机保持在正确的下降航道上。）



a) 波音777导航显示，VOR扩展模式显示
b) 波音777导航显示，VOR集中模式显示

图5—8 VOR方位显示

航向台天线像栅栏结构一样，与跑道成直角并位于进近方向的远端。下滑台天线位于接地带附近的一侧。航向台频率位于108.1~111.9 MHz的甚高频频段，下滑台频率位于329.3~334.0 MHz的特高频频段。每一个航向台频率配对一个下滑台频率（如LOC108.5 MHz，G/S 335.0 MHz），仪表着陆系统频率仅公布航向台频率。选定仪表着陆系统航向台频率，就自动调谐到配对的下滑台频率，仪表着陆系统识别通常由三位或四位字母组成的摩尔斯电码发出。





航向台天线（上）和下滑台天线（下）

航向台信号（见图5—9）由两束重叠的无线电能量波瓣组成，在相同甚高频频率上水平传输，通过调制不同频率的载波而区分开来。两束无线电能量波瓣重叠之处就是跑道中心线的精确位置。飞机位于航向台中心线一侧，所接收到的该侧无线电能量波瓣的信号强度就比另一侧的大，飞机位置相应地在飞行仪表上显示出来。

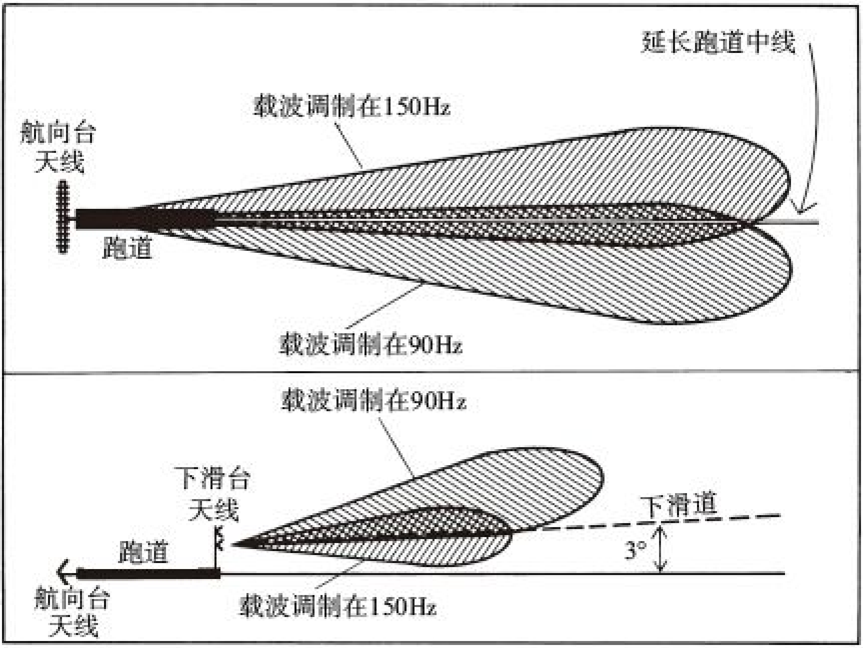


图5—9 仪表着陆系统辐射结构

同样，下滑台信号由两束重叠的无线电能量波瓣组成，在同一特高频上垂直发射，通过调制不同频率的载波而区分开来。波瓣重叠之处就是最后进近所要求的下降剖面，与跑道成3°下滑角。高于或低于3°下滑台，相应的波瓣信号强度增加，也在飞行仪表上显示出飞机位置高于或低于下滑台。

在仪表着陆系统10海里左右时，着陆引导是很精确的，实际上，作为一种进近辅助设备，在50海里或以上就能够截获到其信号。

指点信标台

指点信标都在75MHz上发射，它的辐射是一种低功率的扇形无线电能量结构，只有在高于发射天线的位置才能直接接收到。三个指点信标：外指点标（outer marker，OM）距跑道5海里左右，中指点标（middle marker，MM）距跑道0.5海里左右，内指点标（inner marker，IM）位于跑道入口，过去沿仪表着陆系统布置来指示距离信息，现在，现代喷气飞机速度很快，只保留了一些外指点标。信标的发射频率相同，外指点标无需调谐，每一个指点标发射自己的特定识别码。驾驶舱可听到外指点标信号，是一串低沉的长音。

那些还在使用的外指点标，通常在旁边同时安装有低功率的无方向性信标，称作导航台。这种结合在一起的信标称作外指点标台（locator outer maker，LOM），距跑道3~6海里左右（见图5—10）。当然，这就需要选择无方向性信标导航台的频率，无线电磁指示器上的指针指向信标台。飞机从外指点标台正上方飞过，无线电磁指示器上自动定向仪

的指针快速转向往回指。这一刻用跑表计时，记录开始到接地的时间（进近图上已经根据飞机速度注明了接地时间）。作为一种预防措施，这一点也可通过比较飞机高度与进近图上在外指点标台注明的所需高度，来检查仪表着陆系统下滑台。

现在主要机场在仪表着陆系统都装有测距仪，测距仪几乎取代了航向外指点标。选定仪表着陆系统频率，自动调谐到相应的测距仪，给飞行员提供到接地点的连续应飞距离读数。因此，在这样的仪表着陆系统可用范围内，飞行员选定一个频率，就能获得跑道中心线、下降剖面引导、到接地点距离等保证安全而准确进近所需的信息。

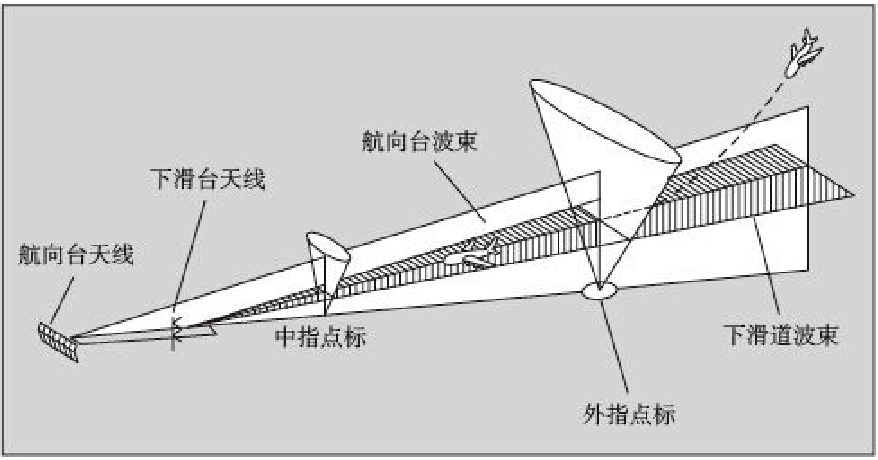
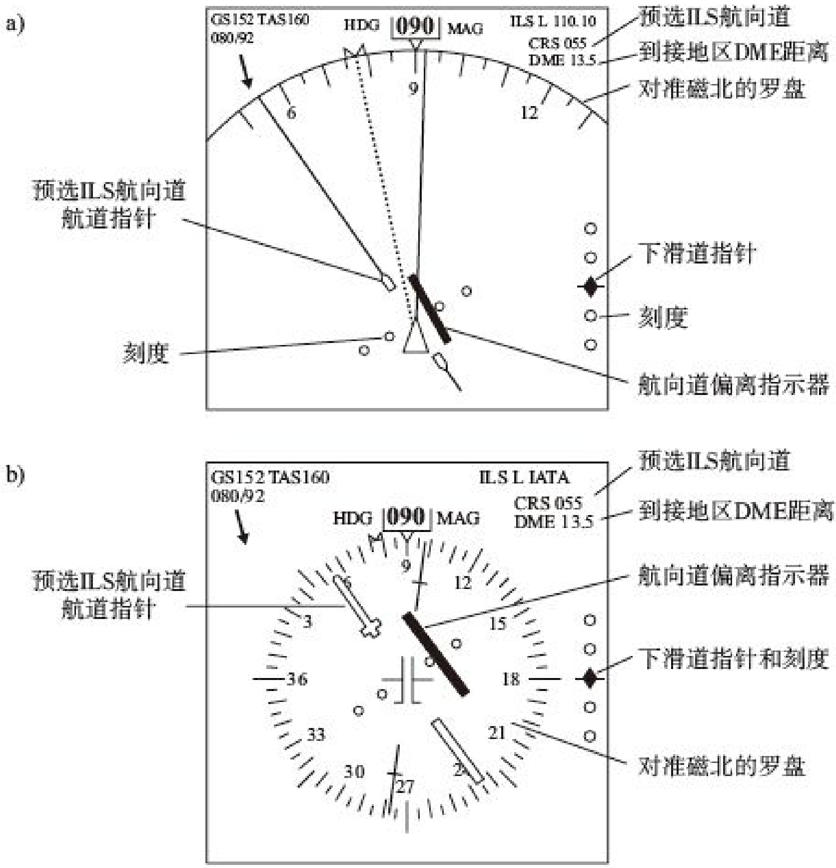


图5—10 航向台

仪表着陆系统显示

仪表着陆系统地面设备发射的航向台与下滑台信号由位于机身上的天线独立接收。罗盘指示器上，跑道中心线位置由航道偏离指示器的偏离杆指示；接收甚高频全向信标信号时，径向线的位置也是以相似的方式指示。航道偏离指示器在仪表的右边，飞机在航向台的左边；反之亦然。航道偏离指示器在中间，飞机位于跑道中心线上（见图5—11）。



a）波音777导航显示，ILS扩展模式显示
b）波音777导航显示，ILS集中模式显示

图5—11 仪表着陆系统显示

在罗盘指示器的航道指针上选定跑道精确的磁方向（如芝加哥奥黑尔国际机场，东北向跑道是039°M），使其指向所需的跑道磁方向。在仪表右边的刻度尺上有一个菱形标识指示的是下滑台位置。作为辅助手段，主飞行显示器上所显示的飞行指引系统[2]提供偏转与俯仰综合指令，把飞机引导到中心线和下滑台上。当飞行指引杆（通常涂成黄色）在仪表中心交叉时，飞机就正好在仪表着陆系统上（见图5—12）。

接通自动驾驶仪，仪表着陆系统可用来自动进近与自动着陆，也可由飞行员来人工操纵飞机，按照仪表上的指示把飞机保持在仪表着陆系统上。准确地手动飞行仪表着陆系统需要很高的技术，大多数飞行员喜欢手动进近，如果运行条件允许的话，可以简化程序，还能保持飞机操纵技能。自动进近要求飞机完成进近的每一阶段，显得有些啰嗦。打开自动驾驶仪飞行也是一个非常复杂的程序，尤其是出现失效或警告灯闪亮时。如果云底很低，如200英尺，自动驾驶仪飞行仪表着陆系统更加准确，此时必须使用自动进近。开始进近前，空中交通管制用雷达还能

把飞机引导到更佳的进近位置。

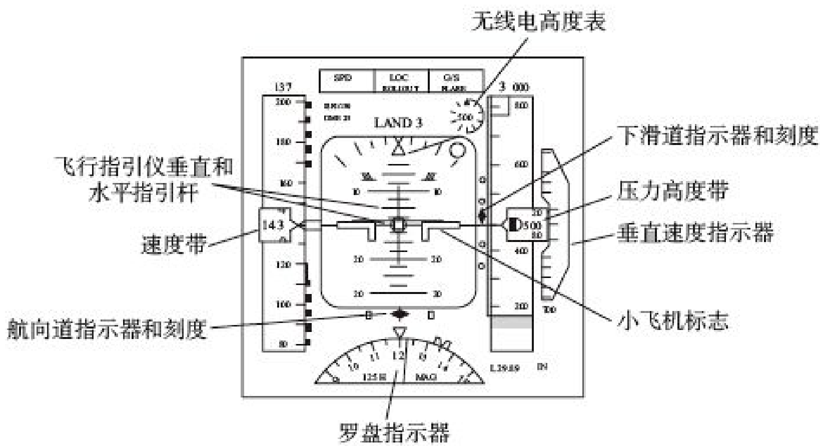


图5—12 波音777主飞行显示——飞机在离接地点500英尺，建立ILS

微波着陆系统

微波着陆系统（microwave landing system，MLS）提供了一种进近航路引导的新概念，但广泛应用还有很长的路要走。与仪表着陆系统一样，微波着陆系统也由两套独立的天线构成，在相应的位置发射进近航向与下降航道引导，除此之外就没有相似的地方了。微波着陆系统发射范围为5 031～5 091 MHz，称作C波段，以时基扫描波束（time reference scanning beam，TRSB）方式来运行。这个系统的主要部分是一个新的精密测距仪，提供飞机到接地点的距离，精确度在30米内，在称作L波段的962～1 213 MHz发射。

在着陆跑道远端的天线发射的方位微波，在跑道中心线两侧往返扫描，最高可达40度的扇形扫描波束。同样，着陆入口附近的仰角天线，提供第二个扇形波束从地面扫描至20度。在进近的飞机上，计时器/微处理器对方位与仰角发射计时，记录从波束首次扫描飞机到再次回来的时间。波束在任何一个给定的弧度来回扫描穿过微波着陆系统全部覆盖区的时间是已知的，微处理器单位把以微秒所记录的经过时间与之比较，就能建立位置，精确、连续、三维位置数据就可随时提供给飞行员。

微波着陆系统有200个频道可供使用，不像仪表着陆系统只有40个；微波着陆系统有多种可能的进近方式，而不像仪表着陆系统只有跑道中心线与3°下滑角引导。短距起飞与着陆飞机与直升机能够编程机载计算机，可进行大角度下降，重型喷气飞机的飞行员可用各种曲线进近全面引导至最后进近位置。飞机计算机在扇形区内任何一点能够锁定微波着陆系统，其范围达70海里宽，20海里长，20 000英尺（约6 000米）高。微波着陆系统自动或人工进近与仪表着陆系统的方式近似，但飞行员可随意选择所喜欢的进近航道。

微波着陆系统更少受干扰，在那些因地形而无法使用仪表着陆系统的地区也能使用。地面附加天线还能为自动着陆提供拉平引导，为反向航向台复飞时提供精密引导。

计算机导航

惯性导航系统

惯性导航系统是一套独立的机载装置，不需要陆基或卫星信号独立导航。该系统通过位于由陀螺稳定在平台上的加速度计来感知飞机的运动，它能连续地计算并显示导航数据。惯性导航系统的信号也为某些飞行仪表与自动驾驶仪提供稳定的参照基准。通常，每一架飞机上安装有三套独立的系统。惯性导航系统的核心就是惯性基准装置，即用来放置在陀螺稳定平台上的加速度计。加速度计基本上是一个小的簧载质量，在加速或减速时通过电子感应其运动，将所产生的信号传输给计算机进行处理。

陀螺是一种旋转装置，在空间具有保持固定位置的属性。举个例子，把一个小轮水平安装进一个轻的框架内就可用作玩具。用力一拉，轮子绕着一个用细绳做成的主轴旋转。轮子旋转时，陀螺可以放置在任何角度，主轴依然保持在固定位置。如果把它竖着放在手背上，手会从一边向另一边摆动，就像飞机的运动一样，而陀螺依然静止不动（见图5—13）。比如，在一个最简单的人工水平仪上，旋转陀螺轮的水平位置，使之作为仪表上的水平基准，飞机滚转与俯仰时，它与实际的水平面保持在固定的位置。

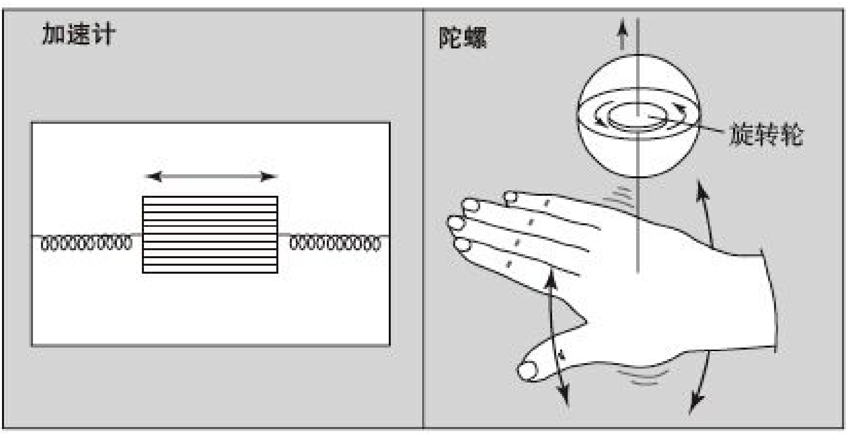


图5—13 陀螺的转动

惯性导航系统里的陀螺与上述陀螺玩具运用的是同样的基本原理，在这种情况下，用电子控制中心的稳定陀螺轮，其转速约100 000转/分钟。

陀螺的这种不变属性也会造成问题。稳定的陀螺在空间里固定的点指示本地的水平面，由于地球在转动，或者飞机在飞越地球表面，本地水平面基准也在变动，但陀螺依然不变地在最初的点指示水平面。为克服这个问题，由陀螺修正马达来电子控制惯性导航系统的陀螺稳定平台，使其保持在本地的水平面，这样既利用到陀螺的不变性，又能继续把陀螺调整到本地水平基准面。这样就可保持加速度计的稳定条件，又能保持相应飞行仪表的本地水平基准面。这就像先打开设备再用计算机重新校准系统的原理一样，这个程序叫惯性导航系统对准。

在起飞的机场，一名飞行机组人员通过控制/显示组件把飞机停在候机楼的停机位的精确实时位置输入惯性导航系统（比如纽约肯尼迪机场，N40°38.9'，W073°46.9'）。接着，惯性导航系统把飞行员输入的实际位置与它认为自己所在的位置进行比较，作出必要的修正来消除下次飞行的误差。所有惯性导航系统导航度量的基准都是真北，要完成重新校准程序，飞机只要能够感应到地球的运动，计算机就会重新计算飞机的实际位置的真北方向。平台上的加速度计感应到地球运动的分力，接着计算机就要处理所产生的加速度信号。相应的信号再转发给装置上的陀螺修正马达，按照所探测到的运动，使平台水平面保持在新的本地水平线上。与地球转动的方向成直角，计算机就可计算出真北。从打开到对准的13分钟左右的时间内，只要感应到地球在运动，计算机就可重新修正校准值，使平台平面保持在本地水平线上，从而建立真北方向，测出任何仪表误差。

惯性导航系统的惯性基准部件由三对加速度计/陀螺构成。两套相互垂直安装在一个水平陀螺稳定平台上，感应水平面的运动。该平台以1转/分钟的速度转动，这样可减少加速度计/陀螺未对准产生的误差。相对于地面而言，随着高度的增加，空中飞过的距离也增加。因此，在垂直平面也安装了一对加速度计/陀螺，来测量飞机在爬升与下降时的垂直运动。整个平台组件安装在万向平衡组件上，这个系统就稳定了。

在导航方式下，加速度计能感应到飞机在水平或垂直平面的任何运动，能产生与所探测到的加速度相应的信号。所输出的这些信号传输给计算机，算出导航飞机所需要的数据（如速度、距离、航迹等）。飞机的俯仰、滚转、偏转姿态的变化也能由小的传感组件同步器探测到，它巧妙地装在万向平衡组件上。同步器产生与飞机姿态变动一致的信号，通过计算机把它传输给相应的飞行仪表用于姿态显示，传输给自动驾驶仪用于飞机引导。

自动驾驶仪上的设备能让惯性导航系统自动导航沿航路飞行，但首先飞行员得告诉计算机飞机的航路，需要在惯性导航系统中输入沿航路的报告点或无线电信标的准确经纬度。这样的惯性导航系统位置就叫航路点，任何时候最多可输入9个航路点，飞机继续前行又重复这个过程。接通自动驾驶仪，选定惯性导航系统，自动驾驶仪自动操纵飞机沿大圆航迹直飞第一个航路点，接着自动把飞机转向下一个航路点，以此类推。惯性导航系统通过自动驾驶仪来导航飞机，飞行员的导航作用就变成了监控惯性导航系统的执行情况。通过测距仪的位置信息更新，惯

性导航系统在航路上的精确度得以提升。

激光陀螺仪

激光陀螺仪是另一种独立的导航辅助设备，能独立于陆基或卫星来导航。尽管名为陀螺，这个系统并不利用稳定陀螺，而是由两个对转的激光束构成，它沿着一个装有角度镜的三角形通道发射，如图5—14所示。任何运动都会导致激光束频移，测量角转动速率就可感应到频移，从而测定角位置。把三个这样的激光陀螺仪相互成直角相交，就可测定飞机的俯仰、滚转、偏转姿态；以相同方式安装的三个加速度计沿同一个轴探测加速度。这个组件被称为惯性基准组件（inertial reference unit，IRU），这套系统就称为惯性基准系统（inertial reference system，IRS）。

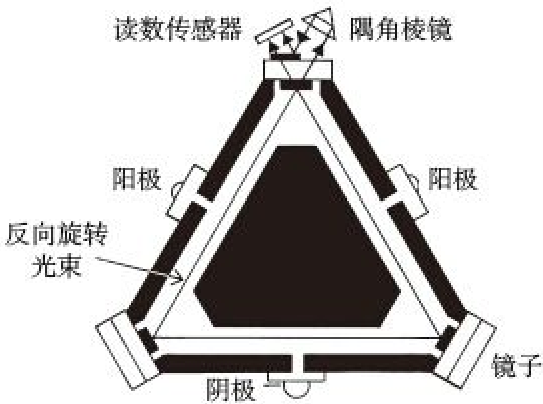


图5—14 激光陀螺

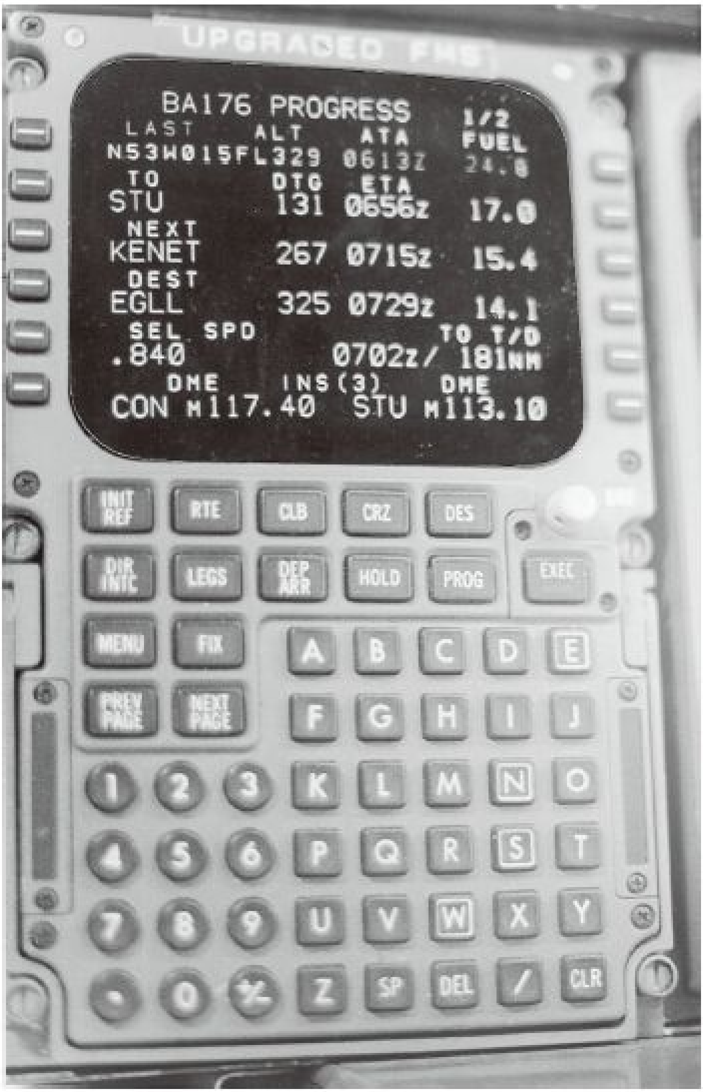
在起飞机场，一名飞行员通过控制/显示组件把机场的四字代码与停机位号输入系统，就开始了与惯性导航系统类似的校准过程，通过感应地球的运动可修正真北的方向与惯性水平基准。由于地球转动或是飞机运动造成的系统的运动，会生成加速度和姿态，惯性基准系统再将其转变，以提供导航信息和惯性水平基准，用于驾驶舱显示与自动驾驶仪系统等。惯性基准系统导航性能与惯性导航系统相似，前者的主要优点是能进行数字输出（满足现代航空电子设备的需要），没有活动部件。

波音777上，大气数据惯性基准组件（air data inertial reference unit，ADIRU）包括6个环形激光陀螺传感器，6个线加速度计传感器，4个处理器，3个电源。环形激光陀螺与线加速度计沿6条不平行的对称斜轴定向，从而提供高度容错系统。惯性基准组件感应到激光陀螺角速率与线加速度，与大气数据（来自皮托与静大气压力源）一起计算从而提供导航与飞行信息，为驾驶舱显示提供惯性水平基准、飞行控制、自动驾驶仪以及其他飞机系统。备用姿态大气数据基准组件为备用姿态指示器提供俯仰、滚转信息，当主要组件失效时，它为驾驶舱显示与飞机系统提供惯性导航与大气数据的备用源。飞行管理计算机控制系统，控

制/显示组件可用于飞行员的导航管理。

飞行管理系统与飞行管理计算机

飞行管理系统（flight management system，FMS）综合了导航、飞行过程的性能、燃油管理与飞机驾驶舱显示系统。自动驾驶仪的自动飞行功能管理航路上飞机的水平导航（lateral navigation，LNAV）与垂直导航（vertical navigation，VNAV）。飞行管理系统的基础就是飞行管理计算机的运行，由每一位飞行员旁边的中央操纵台上的两部独立的控制/显示组件来控制。



飞行管理系统主控制/显示组件

如果需要，通过设备选择不同页面在小屏幕上显示出来。使用键盘

按压数字与字母键可输入与请求信息。尽管“飞行管理系统”恰当地描述了这套设备，但人们提到波音777以及其他现代飞机时，普遍使用“飞行管理计算机”。

飞行管理计算机数据库保存有航路、离场与到达机场的全面数据，包括标准仪表离场（standard instrument departure，SID）程序、标准终端进场航路（standard terminal arrival route，STAR）。数据库所存储的上述导航信息，每28天更新一次。飞行前，位置选择页面把起飞机场的四字代码[3]与停机位号键入计算机，建立飞机位置，如新加坡WSSS。在航路页面选择航路代码，比如SIN　　BAH1（新加坡–巴林，1），可从机载计算机提取整个航路来显示，在飞行管理计算机屏幕上可逐页交叉检查。航路上称作航路点的各点，既可显示经纬度、无线电信标的三字代码、航路交叉点，也可在地图模式上显示某个人工输入航路点的五字计算机代码。航路数据也可自动上传。操作人员在地面中央计算机输入选定的飞行计划的详细数据，如航路飞行高度层与航线上的风。机组发射一个数据链信息“请求”，计算机自动把这个计算好的航路上传给飞行管理计算机。飞机升空后，飞行管理计算机连接到水平导航与垂直导航方式，无需进一步的输入就可自动飞行整个航路。

离场前，人工输入性能数据，如温度、无油重量；飞行中，飞行管理计算机接收到连续输入的数据，如高度、地速、燃油流量、发动机增压比、N1（风扇）速度与飞机外形[4]。选定垂直导航方式，飞行管理计算机在爬升、巡航、下降中保持所需速度或马赫数的发动机增压比，它是由自动控制推力杆的自动油门计算机来实现的。巡航性能计算建立在飞行时间最少、成本最低、距离最远或燃油最少基础上，飞行管理系统的显著优势是其节油能力。

自动油门计算机也用来在发动机失效时计算飞机能飞的高度，以防止发动机失速与熄火。[5]起飞时，自动油门系统自动前推推力杆到预定的起飞推力设置，飞机爬升时，选择爬升方式推力会自动减少。进近时，自动油门计算机设置飞行员所选定的飞行剖面所需的推力；自动着陆时，在接地前自动收推力杆。如果出现复飞，按压推力杆上的复飞按钮将自动设置复飞推力。

通过在一个飞行管理计算机控制/显示组件选择巡航数据页面，另一个组件选择位置信息页面，所有相关性能与导航详情都显示给了机组。飞机向前飞，位置数据页面自动按顺序显示沿航路各位置的预达时间，便于向空中交通管制中心报告。燃油数据、飞机重量、实际风的信息等很容易获得，与航路上某些点的距离与方位也很容易获得。比如，附近适合紧急着陆的机场，如果目的地机场出现延误，可在计算机里输入等待程序。在航路上，飞行管理计算机自动调谐无线电辅助设备或使用GPS数据来更新所计算的位置。

卫星导航

全球定位系统

卫星导航（satellite navigation，satnav）全球定位系统最初开发用于美国军队，之后扩展用于现代民航大飞机来更新飞行管理计算机和其他导航目的。俄罗斯也有他们的卫星导航系统，叫格洛纳斯（GLONASS）。美国和俄罗斯合作开发兼容的导航系统，使用其中一种星座或者两者同时使用。欧洲也在开发自己的系统，叫伽利略全球导航卫星系统（GNSS），日本也在建设取名多功能运输卫星系统（MTSAT）的卫星导航网络。欧洲和日本计划使双方的系统相互兼容，同时与美国导航星（Navstar）和俄罗斯的格洛纳斯系统兼容。

导航星系统由24颗卫星组成，其中21颗是工作卫星，3颗备用来代替失效的卫星。导航星卫星在12 000海里（约19 500千米）的轨道上运行，每一颗卫星发射编码信号给出其空间位置与发射时间。飞机的GPS接收机用时间延误来测量至少来自4颗卫星的距离，通过三角测量法使用最少三个距离来建立位置，第4个用来计算高度和时间。卫星星座导航飞机的精准度达到10海里。这使得区域导航简化了，直飞航路有了更大的自由，而不再受当今的航路系统的限制，不再像过去沿着预先计划的航路从一个到另一个。应用先进的GPS，提高了准确度，系统的整合使飞机仅用GPS一种导航方式，而不像现在很多情况下，使用GPS的同时还要使用并更新机载飞行管理计算机。

在仪表着陆系统或微波着陆系统不可用的机场，GPS可以在低能见度下引导飞机自动进近，但其使用会受到一定限制。使用仅基于GPS的进近，被视为非精密进近[6]，决断高度不低于61米。GPS为飞行管理计算机提供航路点，从而建立带有所要求的下滑台和进近航道的进近剖面。也可选择不同下滑角与曲线进近，它类似于使用微波着陆系统的进近。自动驾驶仪飞行与飞行管理计算机剖面连接的进近，来自GPS的数据可用于位置的交叉检查与更新。飞行管理计算机的惯性基准系统提供系统的整合，GPS提供精确度。在200英尺高度，飞行员必须断开自动驾驶仪来人工着陆飞机。“差分GPS”利用地面附加的伪卫星，有足够高的精确度，在没有仪表着陆系统/微波着陆系统设备的机场可以借助它精密进近和自动着陆，但这种操作性使用还未获得批准。这一先进的系统需要GPS、地球同步卫星、地面地球通信站、地面主站与参考站，成本较高，建设复杂。2008年，基于地面的导航与着陆辅助设备计划开始逐步停止运行。

同样，欧洲先进的卫星导航系统伽利略GNSS，由24颗中轨道卫星组成，高度为15 000海里（约24 000千米）。在2008年前，还有8颗地球同步轨道卫星和世界范围内的30个地面站，没有完全准备好投入服务。

未来空中导航系统

未来空中导航系统（future air navigation system，FANS）界定了

技术标准与要求，综合了基于卫星的通信、导航与监视系统，其开发主要用于空中交通管理。

[1] 是现代飞机驾驶舱由传统的机械仪表革新而来。20世纪70年代，波音757、767客机开始使用阴极射线管荧光屏显示仪表，之后波音777又发展到液晶显示屏LED。——译者注

[2] 飞行指引系统属综合仪表，综合俯仰、偏转指令，由十字或八字指令杆显示。飞行员只要将指令杆操纵至合适位置，飞机便按照俯仰、偏转指令保持飞行姿态。——译者注

[3] 国际民航组织给每一个民用机场的代码，中国的大多以Z开头，像广州/白云ZGGG、西安/咸阳ZLXY。用于空管和飞行业务，民间不使用。旅行社使用的是国际航空运输协会的三字代码，像广州/白云CAN、西安/咸阳XIY。——译者注

[4] 飞机外形指飞机襟翼的位置、起落架收起或放下等外形变化，这些因素都影响着飞机的飞行性能。——译者注

[5] 双发飞机设计时就要求在空中一个发动机失效时仍有安全飞行的能力。但单发飞行的性能降低是不言而喻的。保持不了双发巡航的高度，要飘降（以最有利的速度慢慢下降）至单发巡航的高度。——译者注

[6] 飞机下降着陆过程，使用仪表着陆系统的是精密进近，其余的都是非精密进近。为了安全，两者能下降的最低高度有区别，因此对天气（主要是云高、能见度）要求不同。——译者注

06

飞行仪表

波音777驾驶舱里，计算机生成的飞行参数在主飞行仪表的液晶显示器上显示，其外观与电视相似，这就是主飞行显示器（primary flying display，PFD）。主飞行仪表显示非常复杂，稍后详细讨论。波音777的人工地平仪、空速指示器与高度表等备用仪表，也是由液晶屏幕上传统的仪表显示，与标准仪表板上由表盘与指针构成的基本飞行仪表没有什么不同。主飞行显示器的底部显示圆弧形的罗盘扇形区；位于中央风挡位置上方的备用罗盘是标准液体阻尼磁罗盘，人人都能识别它。每名飞行员前面的第二块屏幕导航显示器（navigation display，ND）也可显示罗盘扇形区或传统的罗盘刻度盘。与主飞行显示器一样，导航显示器也很复杂，稍后详细讨论。为准确地解释飞行仪表的功能，有必要从基础的内容讲起。

在基本的飞行仪表显示上，4块主要飞行仪表形成一个标准组，因其形状称为T型。4块主飞行仪表包括人工地平仪（artificial horizon，AH）、罗盘（compass，C）、空速指示器（airspeed indicator，ASI）与高度表（altimeter，ALT）。其他仪表如垂直速度指示器（vertical speed indicator，VSI）、坡度指示器、侧滑指示器（slip/skid indicator，S/SI），用于导航的无线电磁指示器、无线电高度表（radio altimeter，RA）和时钟等，其基本的T型布局未变（见图6—1）。人工地平仪与罗盘参照本地水平来运行，早期大飞机上惯性导航系统的陀螺稳定平台与更现代的飞机如波音777上的惯性基准系统提供本地水平。空速指示器、高度表、垂直速度指示器是气压仪表，无线电高度表则靠地面反射回的无线电信号工作。

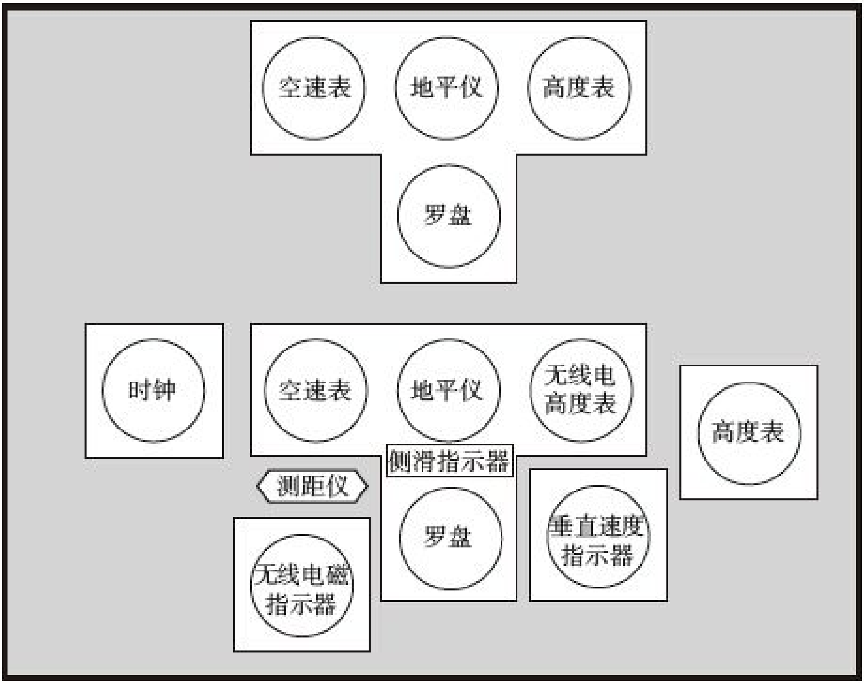


图6—1 飞行仪表

姿态指示器

所有大飞机都能仅参照飞行仪表来飞行，其焦点是人工地平仪，更正确的叫法是姿态指示器（见图6—2）。夜间或有云时，显而易见需要水平参照，但该仪表即使在水平界限明显的晴朗天气条件下也可使用。大飞机的机翼位于飞行员的远后边，在驾驶舱视线之外，所以只用目视难以保持水平飞行。

小飞机标志（通常涂为橘黄色）保持在飞机的两个机翼形态，在飞机俯仰、滚转变化时显示出来，人工水平指标当飞机处于水平时保持在中间。波音777上的姿态指示器在每名飞行员前面主飞行显示器的中心，备用姿态指示器位于机长的中央操纵台上。姿态指示器的数量是3台，这非常重要，任何有两块手表的人都知道这一点。如果一块手表坏了，就无法知道哪一块是正确的。如果有三块手表，可以合理地假设，显示相同时间的两块表是正确的。同样，如果任何一台姿态指示器失灵，通过比较另外两台仪表就可发现失效的仪表。

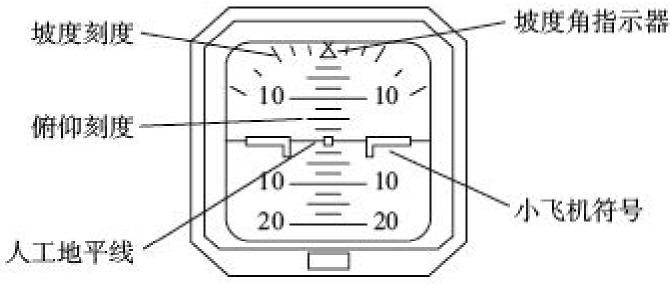


图6—2 波音777备用姿态指示器

坡度指示器与侧滑指示器构成姿态指示器的主要部分。坡度指示器显示转弯时的坡度角，侧滑指示器用来保持平衡的飞行。波音777的侧滑指示器是一个小长方形，位于姿态指示器上方、坡度指示器的正下方（见图6—4）。坡度指示器与水平仪没有什么不同，当飞行中各种力平衡时，飞机处于稳定飞行，坡度指示器居中。

有些飞机的转弯角速度指示器的形状为指针与刻度尺，也构成姿态指示器的一部分。转弯指示器用来显示转弯率（即每分钟转弯的角度），比如，在信标台上空等待飞田径场航线的转弯。转弯率为1，转弯指示器指针指向标度上第一个刻度，表示1分钟完成180°转弯。转弯率为2，指针指向标度上第二个刻度，表示1分钟完成360°（一周）转弯。在转弯期间，如果以某一速度按照选定的转弯率转弯，在一定速度下所用的坡度角不够（正常情况是每次转弯都有固定转弯率），所受到的力会把指示器转离转弯方向，飞行失去平衡，飞机发生外侧滑（skid）。如果所用的坡度角过大，所受到的力把指示器转向转弯方向，飞行发生内侧滑（slip）（见图6—3）。

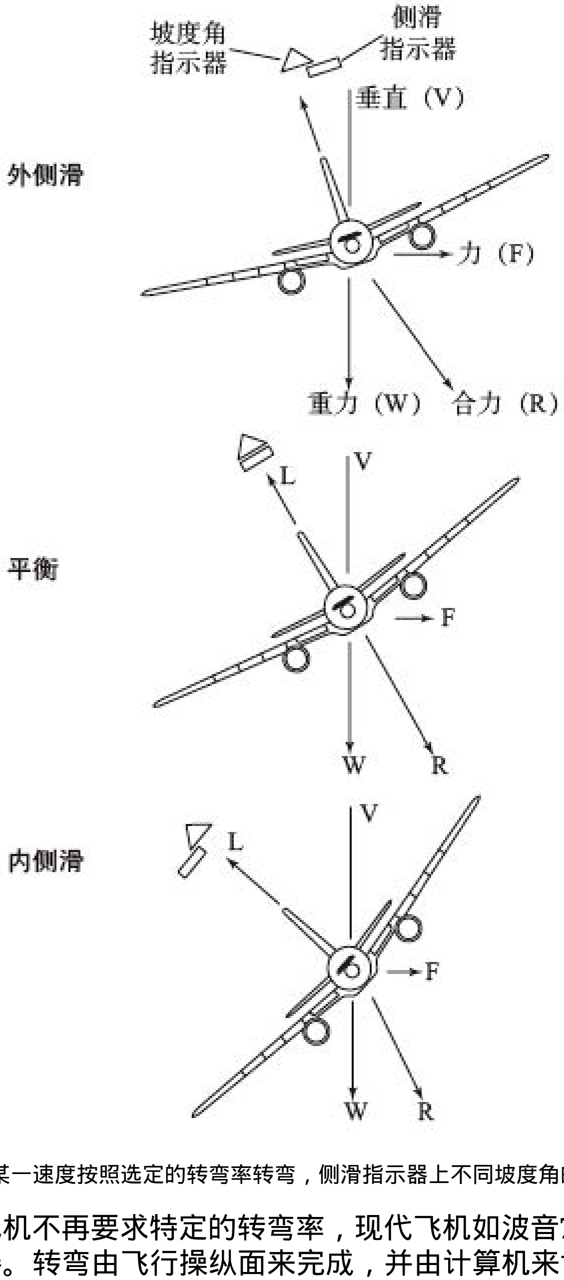
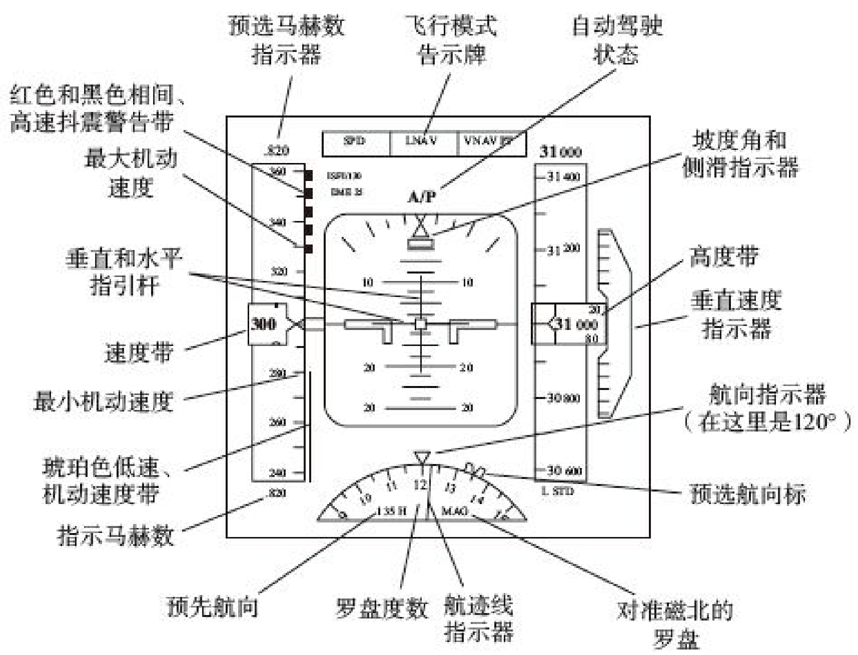


图6—3 以某一速度按照选定的转弯率转弯，侧滑指示器上不同坡度角的影响

不过，大飞机不再要求特定的转弯率，现代飞机如波音777不再显示转弯率指示器。转弯由飞行操纵面来完成，并由计算机来协调修正颠簸时出现的外侧滑或内侧滑；选定的转弯率坡度不正确产生的内侧滑与外侧滑不再是飞行员要考虑的因素。波音777 的侧滑指示器在不对称飞行（即一发失效）时很有用，机头的偏转会把指示器甩离中心位置。此时会用方向舵来抵消推力的不平衡进而消除侧滑。接着指示器又回到中心位置，实现无侧滑飞行。

飞行指引仪

打开飞行指引仪（flight director，FD），姿态指示器会显示两个黄色指示杆——一个垂直，一个水平。它的功能是为飞行员显示所需的飞行上下、左右剖面，在接通自动驾驶仪或人工飞行时“指引”飞机沿应飞航迹飞行。黄色的飞行指引仪杆通过自动驾驶方式选择器接收来自自动驾驶计算机的信息。垂直黄色杆指示选定的航向、选定的甚高频全向信标径向线、仪表着陆系统航向台航路、选定的航迹或计划航迹。要保持所要求的飞行航路，飞行员只需把杆保持在仪表中心来飞行。水平黄色杆指示飞机俯仰姿态，是为保持高度、速度、垂直速度、飞行轨迹角或仪表着陆系统下滑台而要求的姿态。把黄色水平指示杆平行于飞机标记之下，飞行员可保持选定的飞行剖面所要求的飞机俯仰姿态（见图6—4）。



飞机巡航高度31 000英尺，马赫数0.82，指示空速300节，航向120°

图6—4 波音777主飞行显示

罗 盘

基础罗盘（basic compass）由在阻尼液体中转动的寻北磁罗盘构成。这个仪表受到加速度、转弯失误的影响，转弯时会随意摆动。（公路赛车手知道在运动中读出汽车罗盘所遇到的问题。）在高纬度地区，它还受到地球磁场的影响，使罗盘刻度盘向极地倾斜。因此，基础罗盘

不宜作为航向参照，而需要稳定的罗盘系统。

在波音777上，罗盘图像出现在主飞行显示器的底部（见图6—4）以及每名飞行员的导航显示器的顶部。惯性基准系统建立真北方向用于真方位显示。为显示磁罗盘，一部装有世界磁差数据库的计算机在罗盘系统上显示磁北。驾驶舱风挡玻璃中间窗柱顶部的备用罗盘是一个基础罗盘，容易受到上述误差的影响。

空速指示器

运动中的飞机受到称作动压力的大气压力的作用，还受到静压的影响。所承受的动压力指示的就是空速，由一个叫皮托管[1]的设备来测量，它得名于其发明人，18世纪的法国水力工程师亨利·皮托。通常，皮托管安装在靠近机头的地方，那里气流相对稳定，对着飞机前进的方向。它通过加温来防止结冰。飞机的侧边有一个静压口，用来测量静压，然后把它传输给密封的空速指示器仪表盒，在皮托管开口末端所测量的静压与动压传输给盒子里的灵敏膜盒（见图6—5）。膜盒与仪表盒内的静压一致，所以静压被抵消，只有动压才通过联动装置传输给仪表。在波音777上，主飞行显示器的空速指示不是表盘与指针式的，而是在显示屏左边的垂直速度带上显示（见图6—4）。

指示空速（indicated airspeed，IAS）用节（海里/小时）表示，会有数字误差。高空中大气非常稀薄，密度低，令空速读数变低。同样，空气的压缩性（即空气体积减小导致压力增加）使得进入皮托管的空气（速度高于300节时）被压缩，引起空速指示器读数变大。这就需要修正指示空速的读数来补偿密度与压缩性误差，从而获得飞机在大气中的真空速。在正常的大飞机巡航高度，压缩误差可忽略不计，但密度误差导致空速指示器读数减少很大，不宜用作空速指示（比如，在35 000英尺，外界大气温度–60℃，指示空速为280节，而真空速为480节）。高于25 000英尺，巡航速度使用马赫表（参见下一节）。

飞机在指定的速度包线内运行。如果飞机飞得太快，流过机翼上表面的气流速度达到超音速，所产生的冲击波会导致“高速抖振”，人可以感受到它的影响，还会对飞机造成损害。产生高速抖振的速度随高度而变化，空速指示器速度带上的红黑标志段能有效地显示飞机在特定高度所能飞的最大速度（见图6—4）。如果飞机超过最大速度，在驾驶舱里会听到警告声。

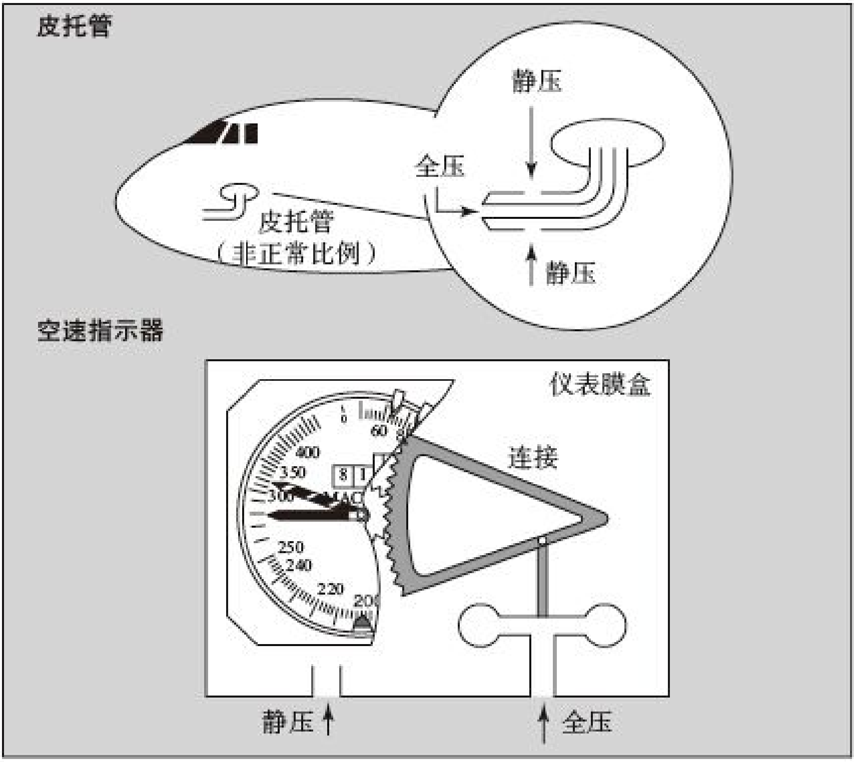


图6—5 皮托管与空速指示器（简化形式）



皮托管

在刻度尺的另一端，如果飞机飞得太慢，机翼上表面的气流开始分

离，产生乱流，飞机就会晃动与颤抖，这就叫遭遇“低速抖振”。出现低速抖振的指示空速，也在速度带上由红色区域显示出来，它前面有一个琥珀色警示区，指示最小操作速度（见图6—4）。计算机计算高速与低速抖振的数值，随着环境的变化而自动更新，如燃油消耗，飞机重量减小，或飞机爬升、下降到不同的高度。

某一高度与重量条件下所有的巡航速度都会在速度带上低速抖振区与高速抖振区之间的范围显示出来。高度增加，飞机需要飞得更快才能在更稀薄的空气中保持同样的升力，并高于低速抖振值。速度增大，飞机又会接近该高度的高速抖振值，如果飞机速度增加几节，会导致高速抖振；如果速度减少几节，就会遇到低速抖振。出现这种情况的时候，用机组的行话来说就是“死角”，也就是飞机理论上的最高运行高度。为给抖振两端提供一个空速裕度，波音777最高运行高度为43 000英尺。然而，在正常使用重量下，波音777 很少飞到41 000英尺以上（见图6—6）。

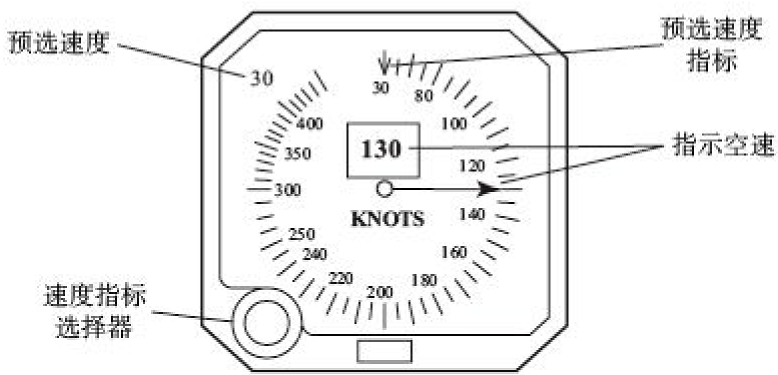


图6—6 波音777备用空速指示器

马赫表

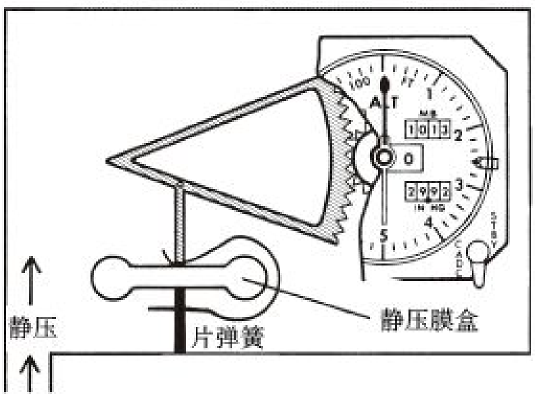
前面提到密度引起的误差，空速指示器不宜在25 000英尺以上用作速度指示。飞机的速度用飞机的真空速与当时音速之比来表示，这就是马赫数[2]，得名于奥地利物理学家恩斯特·马赫。音速不是一个常数，通常高度增高，温度降低，音速减小，在标准气压海平面为661节，30 000英尺高度为589节。任何高度的音速都用1.00来表示，因此指示空速如35 000英尺马赫数0.84就是表示飞机在该高度以音速的84%的速度飞行。大飞机一般飞行高度在28 000英尺到41 000英尺，巡航马赫数的范围在0.80到0.85左右。波音777最大马赫数为0.87马赫。波音777选定的马赫数显示主飞行显示器的左上方，实际马赫数在左下方（见图6—4）。

高度表

在一个简单的高度表里，静压进入高度表仪表盒内。飞机爬升，气压降低，仪表盒内的真空膜盒扩张。扩张的力通过一个联动装置带动指针，从而显示飞机的高度。高度表在校准时使用的是标准气压，实际运用中标准大气情况并不多，现代飞机由计算机来修正提高其准确度（见图6—7）。波音777主飞行显示器的高度显示在屏幕右边的垂直的高度带上（见图6—4）。

准确测量飞机的高度一直是个问题。无线电高度表是非常准确的仪表，但不适用于巡航高度的飞行。如果保持仪表上离地的高度，随着地面轮廓的变化，飞机飞越山脉与河谷上空就需要爬升与下降。无线电高度表仅用于最后进近，准确测量高于跑道入口的高度，实际上仅在2 500英尺以下才启动。

压力高度表



波音777
备用高度表

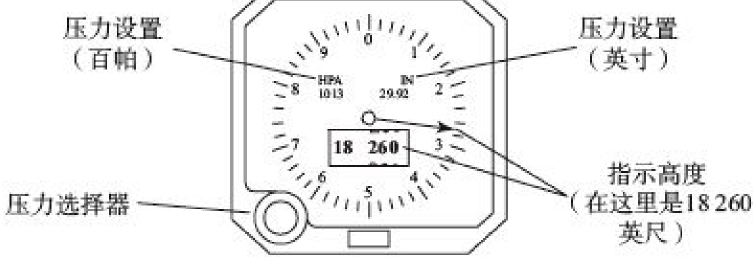


图6—7 压力高度表（简图）与波音777备用高度表

压力高度表是主要的高度指示，但它测量的是气压，同一地方的气压在一天内不断变化，不同地区气压也不同，这就造成更多的问题。在某一地区飞行，所需的重要高度数值是飞机高于平均海平面（mean sea level，MSL）的高度。所有航图上显示的高地都是高于平均海平面的高

度，飞机按高度表飞行能使飞机与高地保持安全距离。用英尺显示正确的高度，通过高度表的调节旋钮在气压刻度窗上设置当前本地的平均海平面气压。相关空中交通管制中心向飞机发送当前平均海平面气压设定值。在北美，给出的气压设定值是英寸汞柱高（in.Hg），世界其他大部分地区用百帕（hP），这就要求高度表有两个分量表来包括这两种设置。

在美国，平均海平面气压设定值称作高度表拨正值，其他地方用QNH，回到老式的无线电Q代码，实际没有任何意义。着陆机场用QNH设置，高度表仍然显示高于平均海平面的高度。把高度表设置到能读出高于机场的高度，着陆时显示零，这相当有益。要做到这一点，机场标高气压设定值QFE由机场塔台发送给飞机（或根据表来计算），飞行员在进近时用它来设置高度表。波音777很少使用机场标高气压设定值，最后进近的高度测量通常读的是无线电高度表。极少数情况下要求机场标高气压设定值，如在哈萨克斯坦的阿拉木图，在最后进近前某一时刻会把高度表设定值从QNH变为QFE。

巡航时，无需本地气压设定值，高于一定高度后，所有高度表都设置为标准气压1 013.2hP或29.92英寸汞柱高。标准气压设定值表示平均每天的平均海平面气压值。比如，在35 000英尺巡航，使用标准设定值，飞机并不一定恰恰在这一高度（除非标准设定值碰巧当时就是该地区的平均海平面气压），但所有高度表都调到标准设定值，可以准确保持飞机之间的间隔。从本地高度设定值转向标准设定值的高度，叫过渡高度（transition altitude，TA），世界各地的过渡高度不同。这个情况有些迷惑性，每一个国家（在有些国家甚至每一个机场）都会根据当地地形确定过渡高度该设置为多少。这个高度从2 000英尺到18 000英尺不等。过了过渡高度，高度用千英尺来表示，此后称作飞行高度层，即省略最后两个零，如35 000英尺变成了飞行高度层350（FL350）。下降时，高度表从标准设定值变为QNH，这个高度叫过渡高度层（transition level，TL），随过渡高度变化而不同。

航空术语中标高、无线电高度、标准气压高度、飞行高度层，其正确用法如图6—8所示，但往往用得很随意。

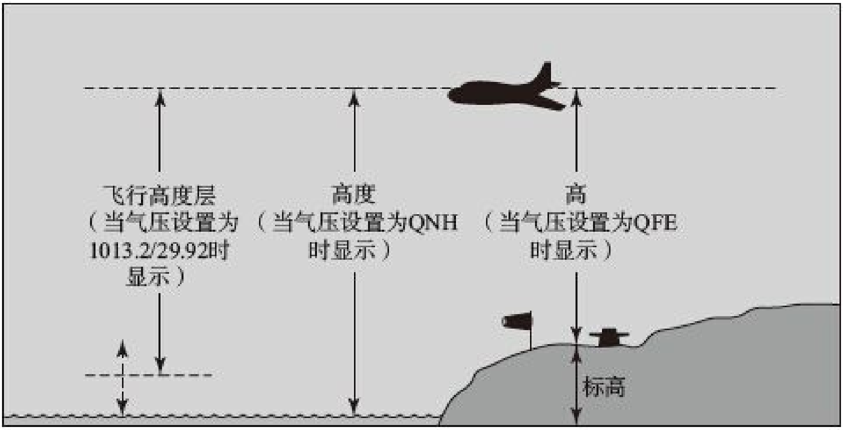


图6—8 标高、无线电高度、标准气压高度、飞行高度层

大型喷气飞机从FL280的标准巡航高度层，向东飞分别是FL290、330、370和410；向西飞是280、310、350和390，对大多数高度层而言，同向飞行允许间隔4 000英尺，对头飞行间隔是2 000英尺。北大西洋与太平洋地区引入了缩小垂直间隔（reduced vertical separation minimum，RVSM），未来几年将在美国与欧洲空域使用。缩小垂直间隔允许FL290到FL410之间1 000英尺（300米）的垂直间隔，这样就增加了6个高度层。在航路上，同向飞行允许2 000英尺的间隔，对头飞行允许1 000英尺的间隔。在北大西洋特别指定的航路上，在同一航迹上同向飞行仅1 000英尺的间隔。

在俄罗斯与中国，以米为飞行高度层，向东飞，比如飞行高度层9 000米，等于29 550英尺。波音777的高度带（表）用英尺或英尺与米来显示选定高度与实际高度。

垂直速度指示器

简单的垂直速度指示器里，静压输送给膜盒，然后通过节气门（restrictive choke）输送给仪表盒（见图6—9）。飞机爬升或下降，因为有节气门，膜盒中的静压要比仪表箱中的静压变得快些，这两者之差修正后能指示出1 000英尺/分钟的爬升或下降率。主要的仪表误差是由于设计本身所造成的记录延迟引起的。比如，飞机延长爬升后改平，仪表继续显示在爬升，直至膜盒与仪表箱压力相等。惯性引导垂直速度指示器很大程度上克服了这个问题。垂直速度指示器在判断爬升与下降剖面方面很有用，在飞机最后进近航段也很有用，尤其是下滑台信息不可用时。大约800英尺/分钟的下降率可以建立很好的最后进近下降剖面。波音777的垂直速度指示器位于主飞行显示器的右边（见图6—4）。仪表上垂直速度带上的指针用1 000英尺来显示下降率或爬升率，垂直速度超过400英尺/分钟时，显示数字读数。

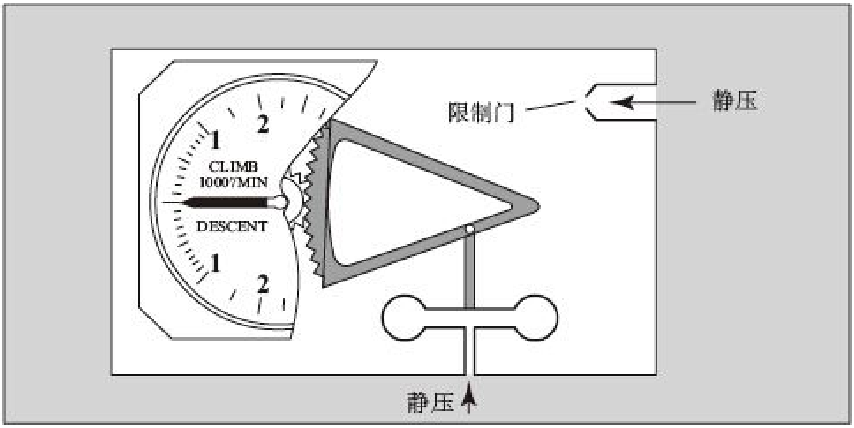


图6—9 垂直速度指示器简单示意图

仪表飞行

航线飞行员训练与实践的最重要的一部分就是仪表飞行。大飞机不能靠看窗外来飞，或凭直觉来飞（尽管它们都有用）；所有的飞行，即使在晴天，都是靠仪表来飞。当然，很多情况下，飞行员确实在晴天寻找目视参照，但速度、高度、航向、姿态都靠仪表确定，飞行员要不停地扫描仪表，防止仅盯住某一个仪表（见图6—4）。飞机不会长时间保持稳定，由于阵风、方向的改变等原因，速度、高度和航向经常稍微有些偏离，这需要飞行员不断地做些小的控制调整来保持应飞航路。然而，出现玻璃座舱后，仪表飞行过程中无需太多的心算[3]，仪表的屏幕显示使扫描仪表变得更容易。

颠簸时，唯一能够提供正确指示的仪表是人工地平仪，其他仪表都会剧烈波动。此时，飞行员集中精力保持飞机的俯仰姿态，只有这时驾驶飞机几乎仅参照一个仪表。

飞行员最重要的年度检查是执照的熟练度检查，它包括在模拟机上使用所有仪表飞行的各种各样的情况，包括模拟不利天气条件下起飞与着陆。飞行中可能出现设置失效与故障，一发失效的情况会需要用到单发仪表进近与着陆。仪表飞行考试必须在设定的极限条件下进行，保持好高度、航向、速度，仪表着陆进近不得超出限度。任何超出限度偏差视为不合格，飞行员要重新检查并通过后才允许航班飞行。

平视显示器

战斗机上普遍使用的平视显示器（head-up display，HUD）现在也用于商业飞机，但波音777未采用这一系统。平视显示器让飞行员把头

保持在正常的观察位置，就可看见在他前面屏幕上显示的来自主要飞行仪表的信息。它在不利天气条件下着陆时非常有用，这样就无需从低头看仪表飞行转到抬头目视飞行。

平视显示器有两大特征：一个是飞行员视线前面的一块玻璃面板；另一个是安装在驾驶舱顶的一个阴极射线管（cathode-ray tube，CRT），会把绿色单色显示投射到玻璃上。玻璃面板被称作组合器，可让视线透过风挡，又可在玻璃上呈现全部仪表显示的反射。

仪表进近时，来自仪表着陆系统的跑道中心线与下降航道引导，与人工跑道一起显示，飞机穿云后与实际跑道融合到一起。

平视显示器的显示不仅能用于仪表进近，也可用于起飞、复飞、巡航。

空间定向错觉

初始仪表飞行训练要克服的一个问题是空间定向障碍现象的影响，它由平衡感官的冲突引起。平衡是来自三个独立渠道信息发挥作用的结果：眼睛、肌肉和中耳里的前庭器官。在晴朗天气条件下飞行，眼睛是主要的平衡信息源，来自其他渠道的反应被抑制。但在云中，除了仪表没有目视参照，飞行员更多的意识来自肌肉与前庭感官。身体从垂直方向移位时，肌觉源自皮肤与关节张力；前庭觉来自前庭器官，它由三个相互成直角的半规管与一个平衡器组成。来自这些渠道的信息提供给大脑，在地面上是一种有用的补充平衡的辅助手段；但在空中，飞行中所受到的力传输给大脑的感觉，与眼睛从仪表所接收的信息往往很不同。极端情况下，这种心理冲突会导致飞行员失去对飞机的控制。

加速与颠簸时的突然运动会扰乱肌觉，稳定飞行时所受到的力会扰乱前庭觉。前庭器官相互垂直的三个半规管，充满着有向两端突出的纤毛的液体。管内的液体感应到俯仰、滚转、偏转飞行的改变运动，从而引起感觉纤毛的倾倒。管道都与充满液体的一个总囊（common sac）相连，平衡器位于这个前庭腔内。平衡器由小的感觉毛组成，垂直向上突出，上面有很多硫酸钙晶体。身体的倾斜引起感觉毛的倾倒，它把倾斜感觉传送给大脑。飞机有坡度时，飞行员能感觉到。然而，连续转弯时，飞行中的力处于平衡，感觉毛返回来与身体保持一致，飞行员明显感到身体是挺直的，飞的是水平直线，但通过仪表，他的眼睛告诉他，飞机正在带坡度转弯。飞机回到水平直线飞行时，飞行员明显感到在向相反方向带坡度飞行，直至感觉毛再一次回到与身体一致的状态。这种直觉扰乱人的感觉，感觉的矛盾会对经验不足的仪表飞行员造成很大的错觉。飞行员需要通过训练去忽视飞行中这些长期所依赖的附带感觉，接受并仅对各种飞行仪表指示作出反应。

仪表飞行要实现较高的精确度，要求大量的训练。良好的技能、丰富的经验和经常的训练是保持航线飞行高标准所必需的。

[1] 皮托管又名空速管，用于测量飞行器的空速和工业设施中气体流动的速度。——译者注

[2] 马赫数小于1为亚音速，近乎等于1为跨音速，大于1为超音速。——译者注

[3] 飞行员在用上一代机械仪表飞行时，对预达时间、下降率、时间与距离的换算等都需要心算。——译者注

07

波音 777 驾驶舱

波音777的驾驶舱是基于波音747–400设计的，所以这两者很相似，它还结合了波音767的结构。驾驶舱布局的模拟开发阶段，有近600名飞行员参与进来，大部分来自各个航空公司。在系统的设计、评估与测试期间，有33名波音公司飞行员试飞了1 500多个小时，之后，300多名航线飞行员又飞了300多小时。最终，一个现代化的驾驶舱环境、一个令飞行员满意的工作场所成型了。

波音777的驾驶舱面积是所有飞机中最宽敞的，气动噪音低，出众的灯光营造了一个安静而又舒适的环境。6块大的液晶显示器（liquid crystal display，LCD）呈现出一个全彩的、计算机生成的图像，使驾驶舱的外观显得干净整洁。大液晶显示器的外观与平面电视屏幕很相似，因而取名为“玻璃驾驶舱”。两名飞行员的座椅可电动调节便于操作，风挡玻璃给出一种宽角视野。每一位飞行员的前侧窗可以曲线打开，向后滑动。每位飞行员肘部的左右侧板上，开窗的下面，是显示屏，用来显示维护与性能数据。驾驶舱的后面，在门的右边，还有两个观察员使用的座位，可让4名机组成员在起飞与着陆时坐在驾驶舱。

波音777的前仪表板横向布置了5块8×8英寸（约20×20厘米）的可互换使用的液晶显示器，显示飞行与导航图像（依靠主飞行显示器与导航显示器）、发动机指示与机组警告数据（由发动机指示与机组警告系统显示），见图7—1。

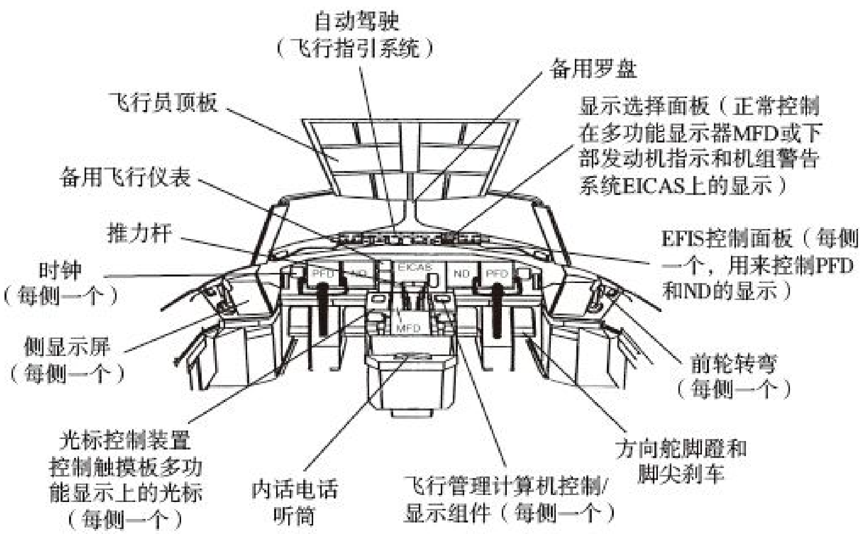




图7—1 波音777驾驶舱布局

第6块液晶显示器，多功能显示器（multi-function display，MFD），也叫下部发动机指示与机组警告系统，位于发动机指示与机组警告系统屏下方的中央操纵台上。中央仪表板左前方是姿态指示器、空速指示器与高度表的液晶备用仪表，右边是起落架手柄、起落架放出备用电门、自动刹车选择器。每名飞行员座位的旁边有一个时钟。前中央操纵台，多功能显示屏旁边，有两个多功能飞行管理计算机控制/显示组件。控制/显示组件除了控制飞行管理计算机外，也是多功能的，可用来选择多功能显示器上的数据。操纵台上从左向右依次有停留刹车手柄、人工配平控制手柄、推力手柄与襟翼手柄。（每一个手柄设计成飞行员熟悉的不同形状，防止一时疏忽使用了错误的控制手柄。）襟翼手柄旁是备用襟翼杆与放出电门。操纵台的每一边，控制/显示组件后面，有触摸屏控制的游标，在多功能显示器上选择数据。操纵台后部是发动机灭火电门。第三块控制/显示组件位于后中央操纵台中间，有无线电、音频选择面板、应答机、气象雷达控制、紧急撤离信号、副翼与方向舵配平控制；后中央操纵台后部是一台小型打印机，用于打印天气、其他数据和客舱内话。

遮光板下的前仪表板，中间是自动驾驶仪与飞行指引系统（autopilot /flight director system，AFDS）方式操纵面板。自动驾驶仪与飞行指引系统右边是多功能显示器选择面板。多功能显示器图像通常在中央液晶显示器下部显示，但也能在任何飞行员的导航显示器上显示出来。飞行员的电子飞行仪表系统（electronic flight instrument system，EFIS）操纵面板位于遮光板的每一边，可用于进近着陆最低气象条件、飞行轨迹引导与高度表的选择，包括高度表、主飞行显示器的公制单位选择，以及导航与导航显示器上的其他选择。

电子飞行仪表系统

每一名飞行员前面有电子飞行仪表系统的两个主要的飞行与导航液晶显示器，叫作主飞行显示器与导航显示器。这些显示与波音747–400很相像，因大小缘故而并置在一起。每一名飞行员通过导航显示器下的电门，可把其他屏幕上的显示转到导航显示器上，但如果主飞行显示器装置故障，它的显示自动转到对应的导航显示器上。

主飞行显示器

主飞行显示器位于每一名飞行员的正前方，显示计算机生成的姿态指示仪彩图，包括图像叠加的飞行指引杆。仪表上方横向排列的是飞行方式显示器（flight mode annunciator，FMA），从左向右包括三个框，分别显示自动油门方式、水平导航方式与垂直导航方式。它的左右两边是垂直刻度，称作刻度带，分别是空速带与高度带，最右边用标尺与指针显示垂直速度。姿态显示的右上方，是一个小的无线电高度表，在2 500英尺以下显示，液晶显示器的底部的圆弧形罗盘扇区显示航向。借助这种独创性的信息显示，以基本T字形的改进型样式，把所有的飞行数据整合进一个屏幕。

在主飞行显示器上显示“飞行航迹引导”（flight path vector，FPV）还有一种方式，可在电子飞行仪表系统上进行选择。飞行航迹引导由一个小圆圈构成，机翼表示飞机，使用飞行航迹倾角时，它就会显示，还可以用其他方式，也可直接选择使用这个功能（见图7—2）。“飞行航迹引导”很有用，它显示任何时刻飞机的水平与垂直航迹。如果飞机的姿态，比如是向上15°，并不意味着飞机的垂直航迹是向上15°。飞机的实际飞行航迹可能接近5°。在这种情况下，选定飞行航迹引导，主飞行显示器的姿态指示器上这个符号高于地平仪杆5°。如果飞机以较大的垂直速度人工来飞，爬升或下降，飞行航迹引导在改平时是一种非常有用的辅助手段，飞行员只需改变飞机的姿态，把飞行航迹引导改到水平。进近时，如果侧风改变，靠水平运动飞行航迹引导就可明显感受偏流。如果在缺乏着陆辅助设备的机场进近，飞机一旦设定在正确的下降航迹上，飞行员只需调整飞机的姿态保持飞行航迹引导在3°向下的位置，就能飞所要求的3°进近航迹角。飞行航迹引导也能及早指示风切变。

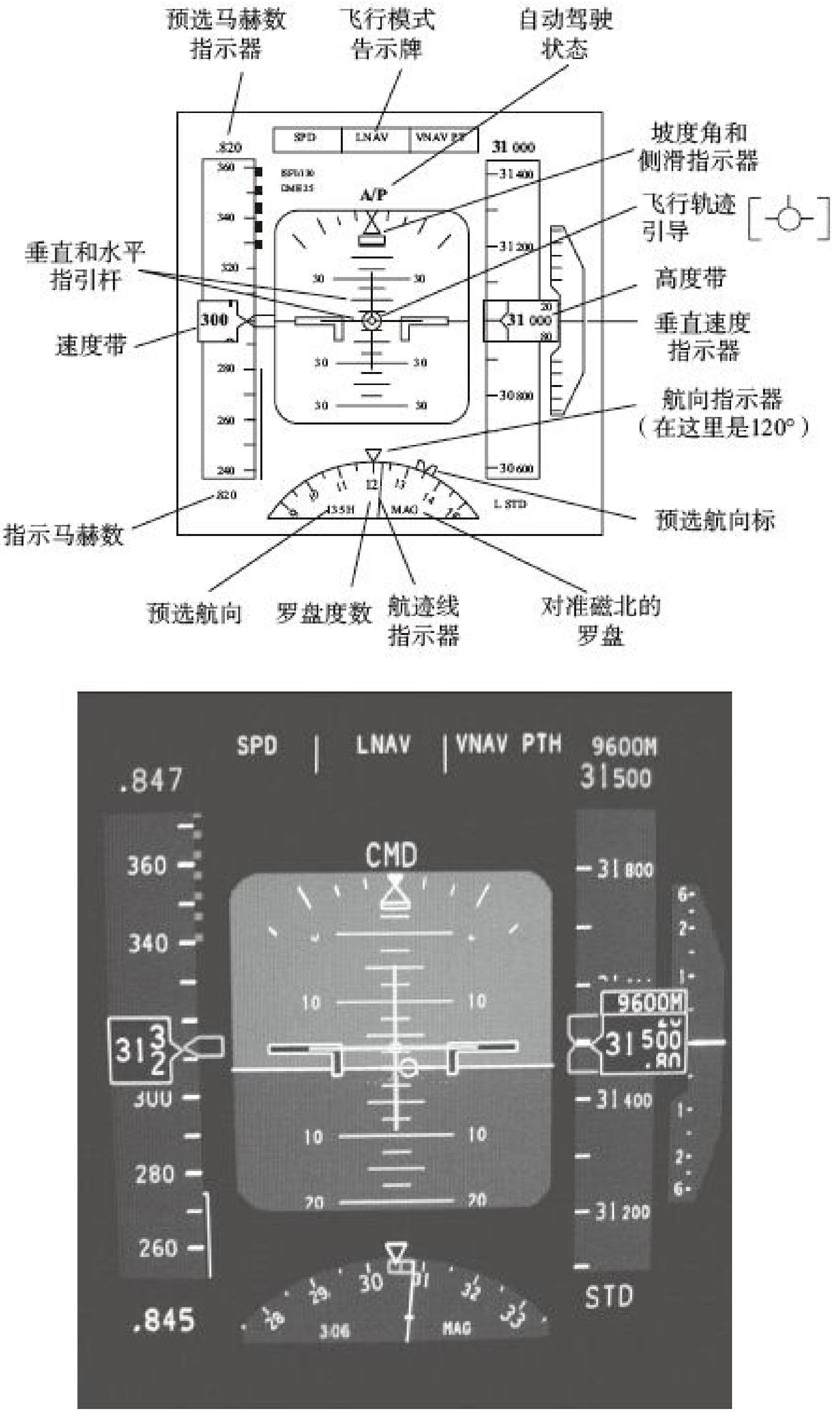
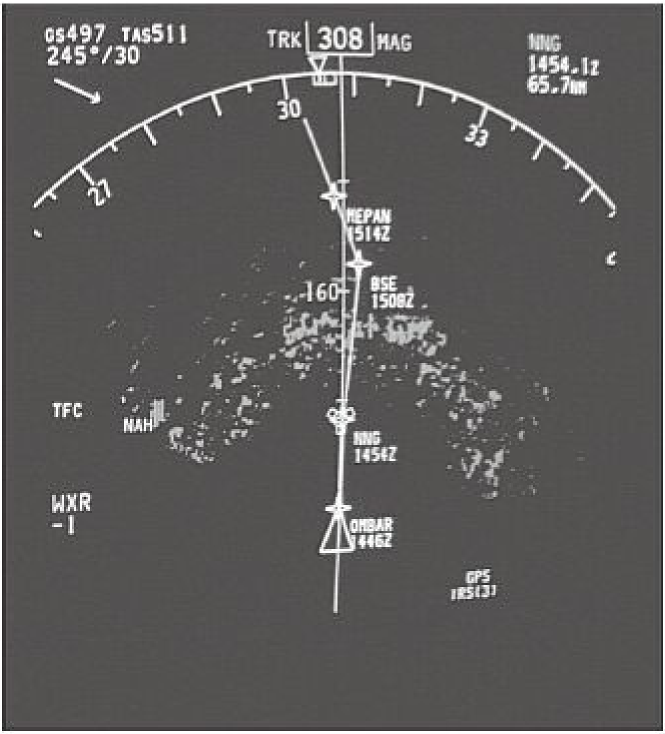


图7—2 主飞行显示，显示飞行航迹引导

导航显示器

导航显示器位于每位飞行员的主飞行显示器内侧，显示各种计算机生成的导航信息。在扩展地图（MAP）方式里，液晶显示器顶部圆弧形的扩展罗盘扇区显示航向与航迹，在屏幕的剩余部分下方绘制的是扩展的航路详图。在屏幕下部，三角形的尖表示飞机当时的位置，地图显示相对飞机航向，表示预计飞行的航路。可选择磁航向或真航向信息，地图距离可设置到640海里。在磁罗盘不可靠的地区（即北纬82°以北或南纬82°以南，或南北磁极附近），罗盘显示自动参照真北。大多数飞行阶段推荐使用扩展地图方式，展示飞机与飞行航路的位置，以运动的地图为背景。地图集中方式下，飞机三角符号位于大罗盘刻度盘中心，显示定向于顶部的磁航向。自动定向仪或甚高频全向信标指针可叠加到扩展显示与集中显示（类似于无线电磁指示器），可用于非精密进近（见图7—3）。



导航显示

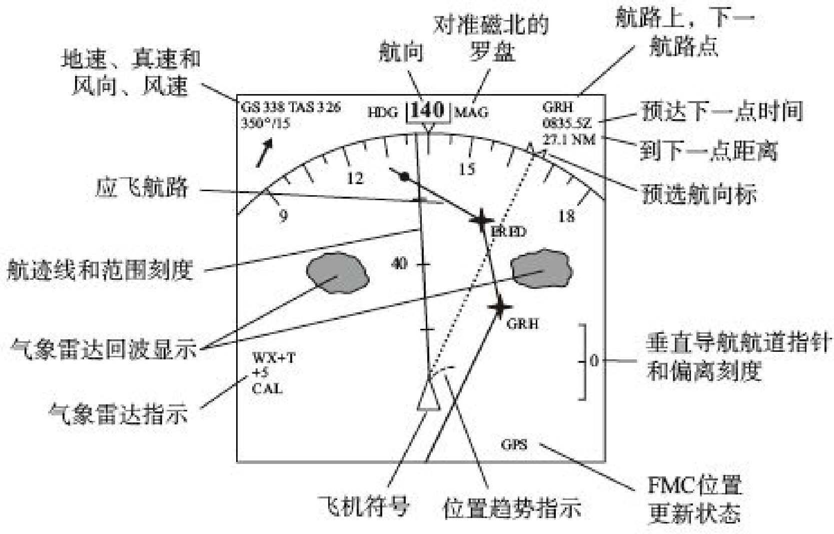


图7—3　导航显示扩展方式，叠加气象雷达

在计划（PLN）模式下，地图是真北在上，可显示航路的某些航段；地图顶部显示磁航向时，也可选择其他方式来显示甚高频全向信标航线信息与仪表着陆系统进近航路详图。选择甚高频全向信标方式，扩展方式可显示甚高频全向信标航道、偏航指示器与刻度；中央模式可在大罗盘刻度盘中心显示甚高频全向信标航道、偏航指示器与刻度。在进近（APP）模式下，仪表着陆系统航向台信息与上述甚高频全向信标显示以类似的方式来呈现，下滑台信息由屏幕右边的洋红色菱形指标与刻度来显示。扩展地图、中央地图、扩展甚高频全向信标和APP显示都可叠加气象雷达图像。可显示的其他数据有交通冲突与防撞系统（traffic collision and avoidance system，TCAS）、来自增强型近地警告系统（enhanced ground proximity warning system，EGPWS）数据库的地形图和预报风切变地区与风切变警告区。

发动机指示与机组警告系统

发动机指示与机组警告系统数据在飞行全过程中呈现在上中央显示屏。主指示区显示的发动机N1（风扇）速度与排气温度（exhaust gas temperature，EGT）用数字显示，该显示由移动指针的半圆形刻度环与阴影弧构成（见图2—4）。主指示区下方显示发动机副指示，以压缩的数字呈现在屏幕上。警告在右边以红色字母显示主要故障或紧急情况，如左发起火（FIRE ENG L），或琥珀色字母显示非优先级别的注意与咨询信息。屏幕的右下方也能显示起落架与襟翼指示，不需要时也可关闭。

多功能显示器

前操纵台的下方中央显示屏用来显示来自多种渠道的信息。当备份的发动机N2（压气机）速度、燃油流量、滑油压力、温度、滑油量和发动机抖振指示显示在多功能显示器上时，这个屏幕通常被称作下部发动机指示与机组警告系统（见图2—4）。也可选择显示液压系统、氧气系统和辅助动力装置指示，状态信息提供离场前需要参照最低设备清单的条件。选择显示系统图显示简化的视图，包括：电气、液压、燃油、空调、舱门、轮胎压力、刹车温度和飞行控制系统。按压一个电门，比如电气系统，可调出一个系统图像，这可以作为机组系统监控的辅助手段。多功能显示器上也可显示电子检查单，屏幕也可用来管理数据链信息。

自动驾驶仪

自动驾驶仪由一位名叫斯佩里（Sperry）[1]的美国人发明，早在1914年就首次在巴黎演示过。自动驾驶仪主要由一个稳定系统构成，它能感应任何不按计划的飞机运动，以此保持稳定的飞行。自动驾驶仪的稳定性最初由基本陀螺提供，但大飞机的稳定基准来自惯性导航系统的陀螺稳定平台，或者来自惯性基准系统的激光陀螺基准，如波音777。稳定基准信号由计算机传送给伺服马达，由它对电信号指令作出回应，然后用所需的液压操作飞行操纵面。自动驾驶仪也对飞行员选择的信号指令作出回应，来自自动驾驶仪的指令驱动操纵面运动，驾驶盘同步运动。它自动使用所需的配平。

自动驾驶仪不会独立思考，但能把飞行员从体力操纵飞机和长时间飞行的乏味中解放出来。减轻负荷后，飞行员关注更重要的运行方面的“飞行管理”。首先要选定所有的飞行参数（爬升速度、巡航高度层、航向等），自动驾驶仪仅仅以相应的方式驾驶飞机来回应飞行员的指令。因此，自动驾驶仪如同一种信息输入：如果给它的是错误信息，它会毫不犹豫地驾驶着飞机朝完全错误的方向飞行。然而，波音777自动驾驶仪能比飞行员更好地驾驶飞机，当然，它也不会感到疲倦，但即使简单的爬升到某一高度的指令也需要飞行员来完成所有的输入操作（见图7—4）。

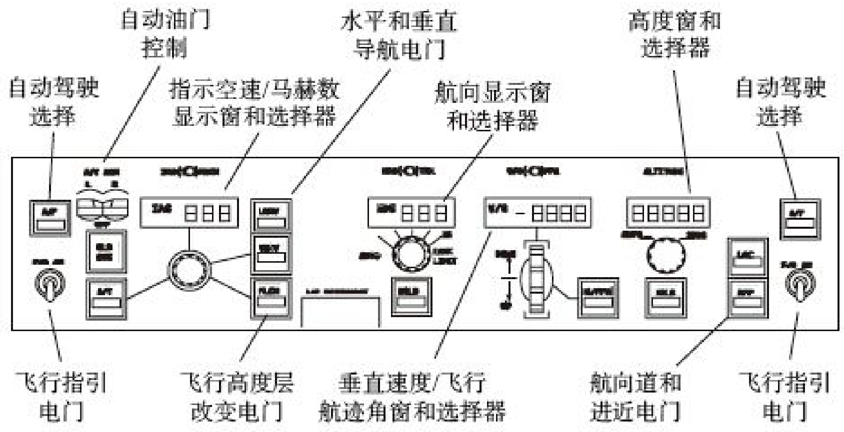


图7—4 波音777自动驾驶仪/飞行指引系统方式控制面板

自动驾驶仪输入（autopilot switching）很复杂，此处不能详加解释。简单说来，自动驾驶仪的运行涉及复杂的程序，远不像大多数人想象的那样，简单到只是按一下“按钮”。（每一个控制电门设计成不同形状，防止因疏忽而使用错误的驾驶模式。）波音777的自动驾驶仪在起飞后不久、低至200英尺时，就能接通自动飞行、着陆和着陆滑跑。为了体验飞行乐趣，保持驾驶实践技能，飞行员通常要到10 000英尺才接通自动驾驶仪。自动驾驶仪在爬升、巡航、下降过程中连续使用，在下降期间断开，或在3 000英尺左右手动进近。正常运行只需接通一部自动驾驶仪，自动着陆则需要两部或三部。

自动着陆

自动着陆，不仅需要机载尖端的自动驾驶仪设备，还需要着陆机场配备精确的地面设备。仪表着陆系统地面设施是自动着陆的组成部分，用于自动着陆要按需升级。进近与跑道灯光系统也需要改进。这些地面设备不可用就无法实施自动着陆。自动着陆还要求从10海里左右直接系统进近，这样最后进近阶段可稳定飞机。实际上世界范围内仅在一些大机场的某些跑道安装有恶劣天气情况下的自动着陆系统，这其中仅有少数机场拥有真正可以盲降的设备。自动着陆主要设计用于静风、大雾条件下使用，在大于25节的强侧风条件下，它无任何优势。这种条件下必须人工着陆。波音777在侧风条件下自动着陆时，接地前偏流角或偏流修正角自动减小。根据侧风的大小，自动着陆在500英尺或200英尺时利用侧滑来减小偏流修正角。飞机以对应于跑道方向带有侧滑、偏流角的方式着陆，机头稍微偏向风向，上风向的机翼要低一些。一发失效也能实现自动着陆，在能见度好的情况下，波音777演示过在40节侧风下一发自动着陆！

仪表着陆系统信号质量划分为I类、 II类、III类（Cat I、II、III），

Cat III再分为a、b、c，Cat IIIc的质量最好。仪表着陆系统Cat I未被批准用于自动着陆，这种情况自动驾驶仪可以自动截获仪表着陆系统，也能够用仪表着陆系统自动进近，但在一定高度要断开自动驾驶仪进行人工着陆。自动着陆必须要求Cat II与Cat III进近，分别需要两个和三个自动驾驶仪。国际民航组织（international civil aviation organization，ICAO）的每一类能见度与决断高的最低限制如图7—5所示，但自动着陆通常在晴天条件下实施。

	一类	二类	三类a	三类b	三类c
最小能见度（米）	550 M	300 M	200 M	50 M	0
决断高度（英尺）	200 FT	100 FT	50 FT	0	0

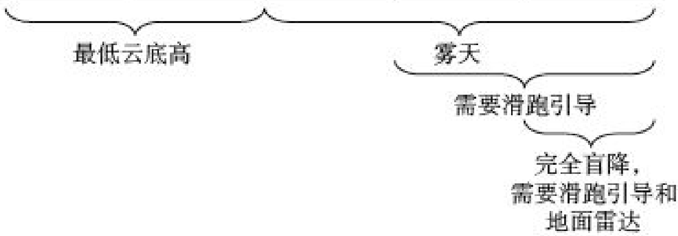


图7—5 ILS类别与限制

波音777的自动驾驶仪在能见度为零（即云底为地面）时能完成自动着陆，但要求最低跑道视程（即水平能见度）75米，以便让机组能找到候机楼。实际着陆时，飞行员可以看跑道灯，或者无需看见任何东西、只需感到飞机接地即可。在低于5英尺时，按压推力杆上的复飞电门还能启动自动复飞。自动驾驶仪把机头向上到要求的复飞姿态，同时自动油门自动前推推力杆到要求的复飞推力。

着陆后，地面管制为每一架飞机指明具体滑行路线，准确引导飞行员到停机口。雾可能分布很不均匀，当机场机动区的能见度低于50米时，机场地面雷达可用于从跑道到停机门的滑行引导，出现事故时也能用于引导消防与急救服务。目前，仅极少数机场安装有有效的地面雷达设备。

波音777上，Cat III 仪表着陆系统航向台信号在着陆滑跑时提供中心线引导，使飞机在跑道上减速时保持直线运行。在着陆滑跑时，自动驾驶仪控制方向舵与前轮转向，使飞机保持航向台中心线。若自动驾驶仪失效，或在不利天气起飞滑跑，安装在仪表遮光板的辅助目视显示器（para-visual display，PVD）在自动驾驶故障时也可用于飞行员的着陆滑跑引导。由于所有的起飞都必须人工操作，所以在低能见度起飞时，辅助目视显示器对飞行员非常有用。辅助目视显示器接收ILS航向台信号，并以一个黑、白相间指令杆显示，引导飞行员沿跑道中心线滑跑。辅助目视显示器的指令杆（白色背景上带黑色螺旋圈）以偏离中心位置来指示，如果飞机向左右偏离中心线，它能引导飞行员回到中心线。

Cat　III条件下运行自动着陆，机组要确定：机场安装有这些进近设备，飞机有这种能力且无技术故障，而且飞行员合格。波音777在垂直能见度为零的情况下能飞到接地点，无需决断高帮机长决定是否继续进近的高度。在飞行管理计算机的到达页面选定仪表着陆系统进近的着陆跑道，仪表着陆系统接收机自动调谐到要求的频率。正确识别仪表着陆系统后，各自的仪表着陆系统代码显示在主飞行显示器上。与此同时，辅助目视显示也接通在备用方式，着陆后滑跑，自动驾驶断开时，它将自动接通，引导飞行员沿跑道中心线滑跑。初始进近时仅接通一部自动驾驶仪，使用航向控制旋钮来操纵飞机。接通一部自动驾驶仪，自动驾驶仪方式操纵面板上的自动驾驶接通灯亮起，主飞行显示器的姿态显示上方出现字母CMD（自动驾驶仪指令）。多部自动驾驶仪接通时，显示LAND3或LAND2。自动油门也接通到选择的预期速度。雷达管制把飞机引导到10~12海里远的位置，切入仪表着陆系统航向台波束，航向与跑道成40°左右的角度。这个阶段，按下进近电门，自动驾驶仪会预位去截获航向台与下滑台，航向台和下滑台预位与截获在主飞行显示器上分别以白色和绿色显示。如果航空公司程序要求航向台必须先于下滑台截获，先按航向台电门。截获航向台后，再按下进近电门。如果出现故障，发动机指示与机组警告系统会显示警告信息，自动驾驶仪全部断开，听到与通常的警告一样的长鸣笛声（wailer　sound），主警告系统灯亮，主飞行显示器上出现“NO AUTOLAND”字符。

从现在到着陆一直是自动的，但要求机组在至着陆的飞行进程各阶段严密监控。整个进近过程中，机长保持把手轻放在驾驶盘上，一旦自动驾驶仪出现失效，则准备接手控制。截获航向台时，字符LOC从白变绿，取代飞行方式显示器上的HDG　SEL（航向选择）。飞机转向跑道方向，自动修正偏流，沿跑道中心的延长线带偏流角下降。随着下滑台指标开始移动，飞机接近下滑台时，起落架放下，设置襟翼20°。接着进入电子检查单的着陆检查。截获下滑台，字符G/S从白变绿，取代飞行方式显示器上的ALT（高度）。飞机完全建立仪表着陆系统，除着陆襟翼选择外，完成所有的检查。

在无线电高度表1 500英尺以下，主飞行显示器显示LAND3，表示所有三部自动驾驶仪接通，自动驾驶仪跑道着陆滑跑引导显示预位。飞行方式显示器上出现白色FLARE与ROLLOUT。现在选择全襟翼，速度调到最后进近速度。在距接地点要求的测距仪距离时（通常为4海里左右），或在外指点标上空，启动计时表，记录到接地点的时间。监控无线电高度表指示，在1000英尺的位置听到自动的“one thousand”（1 000英尺）喊话，做最后的检查证实完成所有的检查单。接收到着陆许可。

如果有一定强度的侧风，在无线电高度表500英尺时，对准跑道方式接通。随着飞机继续下降，无线电高度表变为扩展显示，500英尺—400英尺—300英尺。飞机外面，地面依然被雾遮住。200英尺，跑道对准方式完成。在能见度只有75米情况下着陆，机长在着陆前预计看不见任何东西，但他的眼睛不时从仪表投向外面，搜寻任何微弱的引导灯

光，副驾驶的注意力依然保持在驾驶舱内，直到着陆会一直监控仪表。100英尺，飞机距接地点只有几秒时间。在无线电高度表60到40英尺高之间，主飞行显示器上的飞行方式显示器中字符FLARE（拉平）显示绿色，取代G/S。下滑台信号被抑制，自动驾驶仪拉平飞机。如果飞行方式显示器上的FLARE未显示绿色，机长需快速断开自动驾驶仪，在飞机飞进跑道前拉平飞机，或开始复飞。25英尺左右，推力杆开始向后收回。机长前方视野受到仪表遮光板的限制，下视范围减小，接地区最低能见度75米时，驾驶舱里透过雾仅能看到模糊的跑道中心线灯。低于无线电高度表2英尺，接通自动驾驶仪跑道滑跑引导，主飞行显示器的飞行方式显示器上ROLLOUT显示绿色，取代LOC。几乎同时，由12只轮胎构成的主轮接地，接着机头轻轻下放前轮到跑道。飞机落地。飞机减速时，自动驾驶仪保持接通，继续沿跑道中心线引导飞机。到达滑行速度时，机长断开自动驾驶仪，接管操纵，在指定脱离道使飞机滑出跑道。在大雾情况下，地面雷达将飞机沿滑行道引导至停机门。

飞机系统

飞行员从下图所示的顶板来操作波音777的飞机系统（见图7—6）。飞行员头上的顶板包括空调、增压、气源、电气、液压、燃油控制系统，以及辅助动力装置启动电门、辅助动力装置与货舱火警控制。

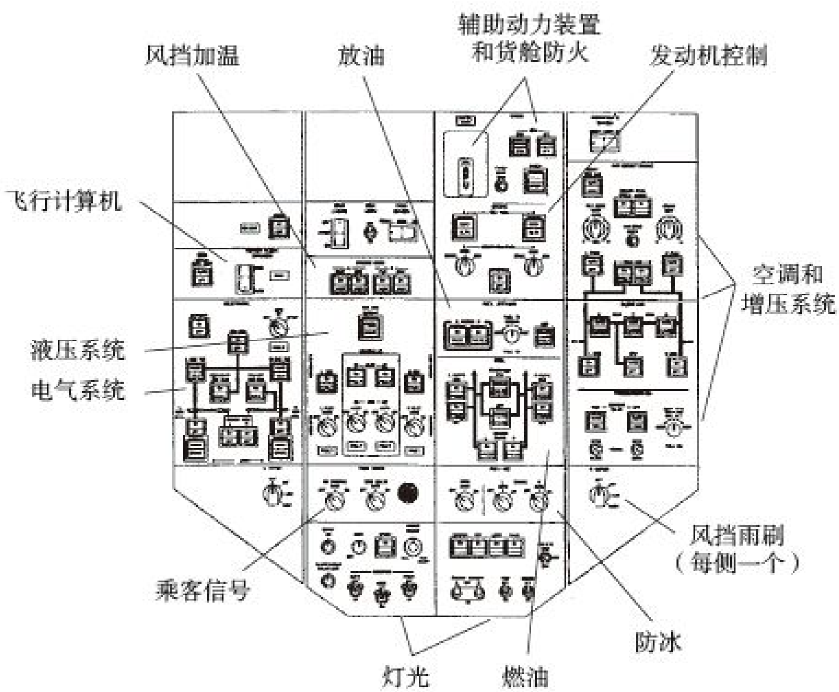


图7—6 飞行员头顶控制板

辅助动力装置不仅能在地面使用，在飞机被准许的最高运行高度（43 100英尺）也能使用。顶板还包括乘客氧气选择器、发动机与机翼防冰选择器，以及其他辅助开关，如风挡玻璃加温、风挡雨刮器、客舱告示灯、飞机灯光等。顶板的常规操作是“设置并自动执行”，离场前设置好系统，整个飞行过程中几乎自动运行。通过发动机指示与机组警告系统来监控面板，根据程度的严重性，警告信息显示红色，警戒信息显示琥珀色。波音777的飞机系统非常复杂，此处仅概述每一个系统。从根本上说，这些系统基于“万无一失”的原则来设计，出现失效可使用备用设备。

空调、增压与气源系统

飞机巡航时就像航行的潜艇。潜艇船体的建造要考虑巨大的水下压力，以防止其压碎船体结构，飞机的机身设计要能容纳客舱的增压空气，防止飞机在高空稀薄的大气中爆裂。飞机爬升时，客舱压力增加以保持舒适的客舱高度。比如，在35 000英尺飞行，客舱压力增加，保持相对于大气6 000英尺高度所产生的压力，因而引起8磅/平方英寸的压差，即客舱内外的压力之差。（飞机客舱门先向内拉再向外推打开，客舱增压时大气压力能有效地把它锁紧。）乘客在6 000英尺高的机舱中不会觉得不舒服，但习惯生活在海平面高度的人，在巡航高度做任何身体锻炼都会感到喘不过气。6 000英尺高度是个很好的平衡，如果客舱高度设计低于这个高度，飞机需要更强更厚的蒙皮，飞机重量增加，运行就不经济。

客舱通过压缩空气导管增压，它直接从每台喷气发动机的压气机引来高度压缩的空气，先经过压力调节活门，再输送到飞机系统。（某些飞机有独立的压气机供给客舱供气。）气源导管中的高温高压空气，不仅用于空调，也可作为压缩空气的来源，用于其他服务。气源导管中的温度太高，无法直接传送给客舱，压缩空气输给两个大的空调组件，通过由外界大气冷却的散热器把温度降到可控的水平。从空调组件出来的空气通过共用空调总管流向7个区域；为了增加空气量，每个区域中部分空气流过符合医用标准的空气过滤器，通过风扇来加速空气的循环。调节后的空气还引向仪表板后面，以减少电气设备产生的热量。

来自空调组件的空气以相对恒定流量进入客舱，两个外流活门电子控制客舱内的气压，一个位于飞机前部，另一个位于后部。打开活门，释放空气进入大气可减小压力，关闭活门可增加压力。巡航时，活门关闭会超过3/4，这样既能实现所要求的压力，又可保持气流流过客舱。飞机爬升与下降时，活门调节爬升与下降的客舱高度。正常情况下，从巡航高度下降，客舱高度会降到目的地机场的高度，但在像墨西哥城这样的地方着陆则是飞机下降而客舱高度增加（墨西哥城在海平面以上6 000~7 300英尺）。

机上有氧气供应，以防出现故障导致释压。氧气面罩自动从客舱顶部掉下来，给乘客提供足够的氧气（飞机机组有专门的氧气面罩），飞机紧急下降到无需增压的高度（通常在10 000~14 000英尺之间）。如

果因医用需要氧气，可在这个管路上接入面罩。

发动机压气机的压缩引气也可作为气压动力来运行某些设备。气动泵可为液压系统增压做备用，热加压空气也可输向发动机舱与机翼前缘防冰。在地面，系统可从地面气源车增压，或从辅助动力装置压气机增压，系统也可通过给发动机启动马达逆向供应压缩空气，来启动发动机的转动，或辅助动力装置未运行时启动辅助动力装置。发动机关闭前通常先启动辅助动力装置，辅助动力装置是地面空调的主要气源。飞行中，低于22 000英尺左右时，辅助动力装置压缩引气都是可以使用的。

电气系统

两台发电机一起产生的电力（115伏）足够供应一个小城镇，这些电力能够满足大量的机载电气、电子、灯光、厨房设备所需。发电机在不同的推力设置下会速度不同，这就要求一个机械的恒速驱动系统来保持恒定的电力供应。每台发动机上还有另一台备用发电机，出现发电机失效时，每台发动机上的永磁发电机专用于波音777的电传操纵系统。一台发动机或发电机失效，电门自动操作，在剩余发电机之间分散负荷，卸载非必要供电。辅助动力装置也有与发动机相似的发电机，在飞行中可以提供电力，飞机的主电源失效时辅助动力装置会自动启动。主电源失效，飞行中冲压空气涡轮（ram air turbine，RAT）[2]发电机自动放下来提供电力（与液压动力）。冲压空气涡轮从飞机的后机腹下放，气流驱动前面的螺旋桨来转动发电机。展开后，它只有在地面才能收回。在地面，地面电源车（ground power unit，GPU）或辅助动力装置发电机也可提供电源。有些设备要求直流电，变压整流装置（transformer rectifier unit，TRU）把交流电转换为28伏直流电。电瓶也可为某些关键仪表与控制器供电，整个电力系统失效时给紧急灯光供电。辅助动力装置有自己的用于启动的电瓶。断路器保护电路，电路超载时会“弹出来”断开电路（见图7—7）。

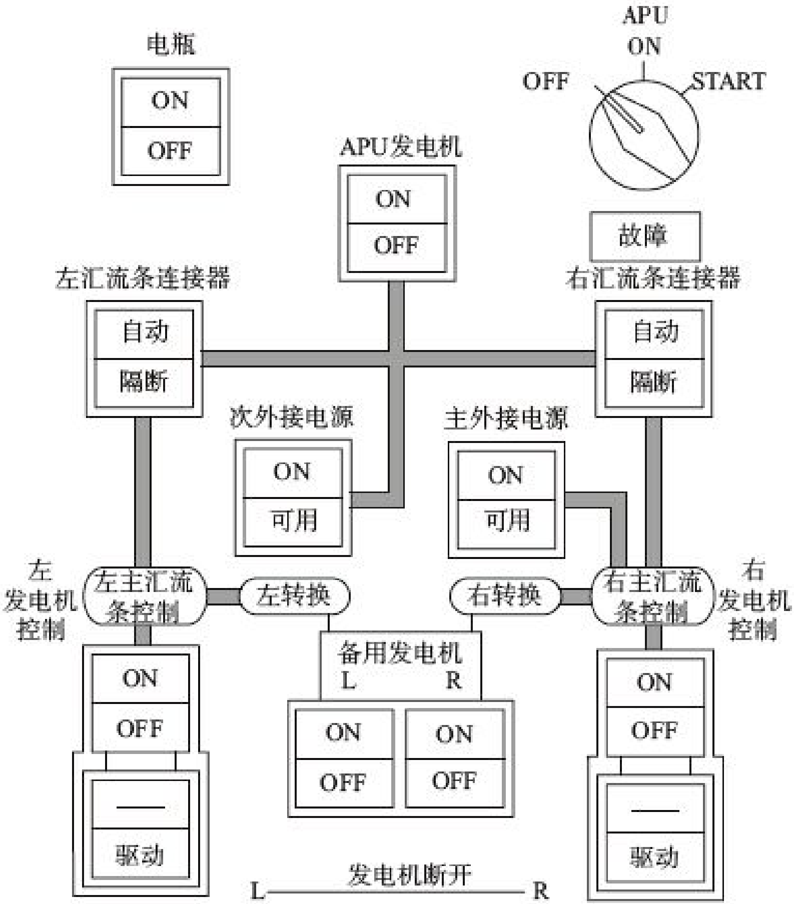


图7—7 飞行员头顶电气面板

液压系统

三套完全独立的左、右、中液压系统，给下面这些装置提供动力：飞行操纵面、前缘襟翼、缝翼、后缘襟翼、起落架、机轮刹车、机轮转向与发动机反推。飞机驾驶舱里的某些操作，如选择起落架手柄（收上或放下），触发了有很大压力的液压油把力传递给液压管路去驱动设备。左右液压系统由各自发动机上齿轮箱驱动的机械主泵来增压。为了增补高需求的液压动力，或主泵失效，还配备了左右电动马达驱动的液压需求泵。中间液压系统由两部电动马达驱动的主泵增压，后者由两部气动驱动需求泵做备用。需要时，冲压空气涡轮也能放下为主飞行控制提供液压动力。如果两台发动机失效或/且液压系统压力低，冲压空气涡轮自动放下。左液压系统提供飞行控制与左发反推，右液压系统提供飞行控制、正常刹车与右发反推。中间液压系统提供飞行控制、缝翼、襟翼、起落架、备用刹车、前轮与主轮转向。液压失效时，前缘缝翼与后缘襟翼可用电来操作。



起落架

主起落架由12个主轮构成，6个轮子分别装在两个万向架上，前轮有一个两轮轴。在地面上滑行时，飞机靠驾驶舱里的一个小舵杆操纵前轮来转向；急转弯时，每一个主起落架的后轴与前轮向相反方向转动来减少轮胎的摩擦。使用方向舵脚蹬可向两侧以最大7°的角度来转动前轮，实现用方向舵的小转向。舵杆的输入超控方向舵的输入。方向舵脚蹬板上的脚踏板用来刹车，也可设置为着陆时自动使用。如果探测到侧滑，防滞装置可调节刹车压力。起飞后，起落架收上时自动刹车，防止机轮在轮舱里转动。液压失效时，选择驾驶舱的电门，用备用系统放下起落架，一个电动液压泵运行释放所有轮舱门的上锁与起落架，让起落架通过重力掉下来，用空气负载将其锁在放下位置。

燃油

波音777的燃油系统很简单，只有三个油箱。一个油箱位于机翼间的机身中间部位，装有98 800升或79 300千克燃油。每一个机翼有力地承载一个大油箱，装有36 200升或29 100千克燃油。总燃油量为171 200升或137 500千克（见图2—7）。飞机每小时用6 000~7 000千克燃油，可飞20小时。要是带这么多的燃油，乘客与行李的有效载荷就不多了，有油而无用。飞往美国东海岸的大多数飞行，中央油箱都没有使用，机翼油箱总共装有58.2吨燃油。第11章叙述了从伦敦到波士顿的飞行，载油量为52 000千克。

每个机翼油箱有两个泵，中央油箱有两个泵，如果所有油箱装满，先用中央油箱的燃油。飞机一离开地面，受升力的影响，机翼会向上弯曲。如果尽可能长地保持机翼中燃油的重量，机翼弯曲度会减小，机翼的疲劳也会减小。最初，打开所有的燃油泵，但要确保先用中央油箱，

中央油泵要比机翼油泵功率大。中央油泵可超控机翼油泵，防止燃油从机翼油箱流出。中央油箱空了，机翼油泵不再被超控，燃油从机翼油箱流出。发动机指示与机组警告系统信息显示，现在中央油泵关闭。此时，飞机重量减轻，导致机翼弯曲度减小。

波音777最大起飞重量是297.6吨，最大着陆重量是208.6吨。起飞后一发失效或出现类似严重问题时，通常要求飞机返回到离场机场，如果飞机以最大重量起飞，在着陆前它需要用掉或抛弃掉89吨燃油。波音777安装有放油系统，出现这种情况时，得向机外泵出燃油。只有在更加紧急的情况出现时，飞机才被允许超重着陆。每个机翼油箱的放油泵与中央油箱的正常泵，用来把燃油泵出到每个机翼的排放孔（位于襟翼外侧）。泵油前，通常要求爬升到一个合理的高度，最好是水面上方。一开始是以2.5吨/分钟的速度泵出燃油，中央油箱放空后，速度减小到1.4吨/分钟。燃油到达地面前已经汽化。

航空电子设备与飞机信息管理系统

飞机信息管理系统（aircraft information management system，AIMS）是波音777新引进的系统。技术、故障容差、微电子、软件等的发展，可以开发出高度综合的数字航空电子设备。飞机信息管理系统有两个机柜，作为8个航空电子系统的主计算机，连接起近130个不同装置、传感器、电门与指示器。大量的连接使得飞机信息管理系统在同一个地方可收集飞机系统的大部分信息，更加有效地把这些信息整合用于中央维护计算、飞行数据记录，以及飞机位置监控与显示。对飞行机组而言，很多组件都是飞机信息管理系统的一部分，包括主显示系统——主飞行显示器、导航显示器、发动机指示与机组警告系统显示与警告功能、多功能显示器、电子飞行仪表系统操纵面板、仪表源选择与转换面板、系统概略图、控制显示装置、游标控制设备（鼠标类的触摸板）。飞行管理计算系统、推力管理系统、飞机通信寻址与报告系统数据链、甚高频无线电与卫星数据装置，也是飞机信息管理系统的一部分。如果用数据总线把上述系统全部连接起来，那它们都是飞机信息管理系统的一部分。维修工程师在驾驶舱后面使用个人电脑，就可进入中央维修系统，把飞机信息管理系统机柜用于计算机处理。

[1] 埃尔默·斯佩里　1860年生于美国纽约州的科特兰，发明了陀螺罗盘。1912年，他的儿子劳伦斯·斯佩里20岁拿到了飞行执照，完善了父亲的发明并用于自动飞行。1914年6月18日，父子参加法国的飞机竞赛，儿子表演了自动飞行，获得成功。——译者注

[2] 冲压空气涡轮装在飞机的腹部，它是一个利用飞机速度带动风车为动力源来提供发电、液压的装置。在空中，当两个发动机失效、两个AC汇流条断电或三个液压系统压力低时，它会自动放出。——译者注

08

气象条件

关于气象学的知识，一本书也说不完，本章仅限于对世界气象总体状态做一简单描述，然后详细介绍天气的局部影响，以及它们对飞行员的影响。

天气是所有影响飞行的因素中最重要的一项，燃油紧随其后。天气往往决定燃油量。飞行前的准备，天气检查是第一项。飞行员必须很好地掌握气象基本知识，可以快速准确地研究气象图与可用气象信息。当然，最最重要的因素是预计到达时目的地机场的预报天气，其次是选定为备降机场的天气预报，还要检查起飞机场（如要求返回基地）以及航路上机场（紧急情况下可能要求降落）的预报。还要研究提供如下信息的气象图：高空风、高空温度、云层状况、晴空乱流（clear air turbulence，CAT）、结冰预报等，并注意影响航路的任何重要天气。

目的地机场与备降机场的天气必须好于最低气象条件，这取决于诸多不同因素，如地形障碍、无线电进近辅助设备的质量等。比如，从伦敦到纽约的最低气象条件，例如，云底高（英尺）和能见度（米），肯尼迪国际机场人工仪表着陆系统进近不低于云高离地200英尺和能见度600米，在合适的跑道自动着陆有雾的情况下能见度变为75米。把波士顿选作备降机场，备降机场的最低天气要求更高一些，波士顿的天气必须是云底高于800英尺，能见度2法定英里。（使用的单位前后不一致，不过现实中就是这样！）

飞行前天气预报有坏天气（目的地机场或航路预报），离场前需要全面讨论备选方案，如使用不同的航路、飞行高度层，甚至更换目的地（或许要带更多的燃油），由机长来决定所需作出的任何改变。所有的飞行，不论天气如何，需要不断地检查天气，通过飞机通信寻址与报告系统可以打印出天气预报。如果目的地机场的天气迅速恶化，或者航路上预报有意外的恶劣天气，需要守听世界范围内各地广播发出的预报。

就像海上的船员一样，飞行机组理性而积极地尊重天气，非常小心地对付多变的天气。

世界气象条件

从根本上说，气候是温度和湿度波动的结果。地球表面70%由水组成，大气中水分的来源显然是由蒸发所引起，热源来自太阳。太阳光线直射地球，如赤道地区，地面温度高；光线斜射地球，如极地附近，则地面温度低，因为要加热的地面面积太大了。两极接收的地面热量最小，因而形成了大面积的冰覆盖。

如果地球表面到处都是平的，太阳整年均匀加热，气象条件很可能会保持稳定。然而，地球转动轴与绕太阳运转的平面有一定倾斜角，在

南北半球的夏季时会向太阳倾斜。一年内地面受热影响的不同，导致年度天气模式不断地改变。大气导热性能很差（比如，大气吸收热量很慢），我们在地球上感到的温暖，是太阳光线加热地面的结果，地面再将热量辐射（放出）进大气。陆地容易吸收来自太阳的热量，可是也容易辐射热量。比如，沙漠里，白天温度高，晚上则由于辐射强而导致热量损耗，可达零度以下。同样，像北美这样较大的大陆块，夏季热而冬季冷。尽管山顶高度高、离太阳很近，但离热量辐射较强的地面更远，结果山顶更冷，那里为白雪所覆盖就可证明。

另一方面，水面比陆地导热性能更差，吸收热量或辐射热量更慢。在沿海，白天和晚上陆地与海洋的温差很明显（白天陆地更暖和，晚上海洋更暖和），陆地温度每天频繁上升，并形成海风。

气 团

影响温度的最重要因素是纬度，不同纬度太阳受热影响不同，导致大气围绕地球形成明显的带状，如图8—1所示。

每一个大气带内大气的属性主要取决于温度与湿度；大气温度越高，容纳水汽的能力越强。属性大致相同的大气覆盖大范围地区时，或许跨越成百上千海里，这称为气团。假设气团性质一致，在比较均匀的区域，它可以数天内保持相对稳定。但气团不会长期保持稳定，很快就会以不断变化的景象运动。因此，气团可根据其发源地分类。某一纬度带发源地的气团，温度范围相似，但湿度取决于发源地是水面还是陆地，气团又细分为陆地气团与海洋气团。比如，发源地为热带大陆的大气，冬季在北非上空，夏季在美国中南部。可想而知，热带大陆大气温暖而干燥。另一方面，发源地为南大西洋与北太平洋的热带海洋大气，是高温高湿的大气。

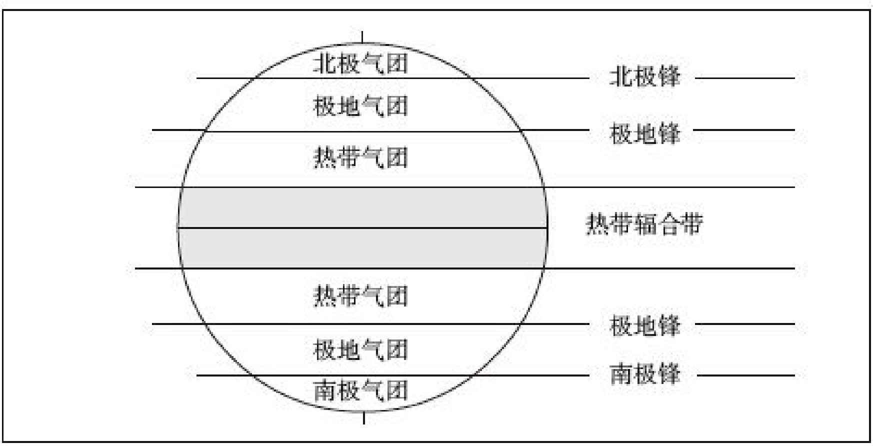


图8—1 围绕地球的大气带

锋面活动

不同属性的大气带之间的交界面界限分明，如主要大气带之间，北极圈大气（或南极圈）与极地大气、极地大气与热带大气，但过渡区可能有数海里之宽。来自附近主要大气带的本地气团，随风而动，相互侵入对方领地，在主要大气带之间形成波浪一样的冲突区。第一次世界大战期间，两位挪威气象学家研究了这种现象，把气团前进的界限边界命名为锋。气团间的差异主要是温度与湿度，最重要的差异通常是温度。温暖的气团前进，取代更冷的气团，这两者之间的锋线就叫“暖锋”；冷气团取代暖气团，两者间的锋线就叫“冷锋”。北极圈与极地带之间的过渡区叫北极锋（南极锋也一样），极地与热带大气带之间的过渡区叫极峰。热带大气带之间的过渡区在赤道汇聚，界限不很明显，稍后讨论。

锋并不稳定，随太阳热效应而移动，北半球夏季向北移，冬季向南移；南半球则相反。强烈的锋面活动的一个例子，就是横穿北大西洋的极峰。对立气团之间相互作用，导致锋面形成破碎的波浪形状，该锋面穿过大西洋，冬季从佛罗里达延伸到英国西南方，夏季从纽芬兰延伸到法罗群岛[1]，与盛行西风一道不断向东移动到欧洲和斯堪的纳维亚。锋的运动速度在30～40节之间，一天内能轻松移动1 000海里。在大西洋中部看见的锋，往往24小时内到达欧洲。

主要大气带之间的温度差，如北极圈（或南极圈）与极地大气之间，极地与热带大气之间，足以形成明显的锋面结构，但在赤道汇聚的南北热带大气带，情况却不是这样。这种情况下，每一个大气带的温度与湿度特征几乎相同，这两者间的过渡区很宽，界限不分明。热带大气带的汇聚区可能有数百海里宽，扩散太开，无法辨别出明显的锋面，称为热带辐合区（inter-tropical convergence zone，ITCZ）。热带辐合区也受太阳的影响而移动，北半球夏季位于赤道正北，南半球夏季多半位于赤道以南。辐合区内的气团通常温暖、潮湿、不稳定，导致大范围内剧烈的天气活动。热带辐合区向北移动横穿大面积的海洋，温暖大气因水汽而变重，形成巨大的云体，剧烈的雷雨云达200～300海里纵深，产生经常性的暴风与热带倾盆大雨。

印度与远东剧烈的西南季风天气，就是热带辐合区运动形成的，它首次出现在初夏，热带辐合区在高空向北移动。接近冬季时热带辐合区向南移动，导致东北季风，但此时大气更加干燥，更稳定，热带辐合区主要来自于陆地。热带辐合区的运动以及相应的恶劣天气状况，在受其影响范围内操作的所有飞行员都会熟知，大部分飞行机组在初夏都不愿飞印度，这并非巧合。

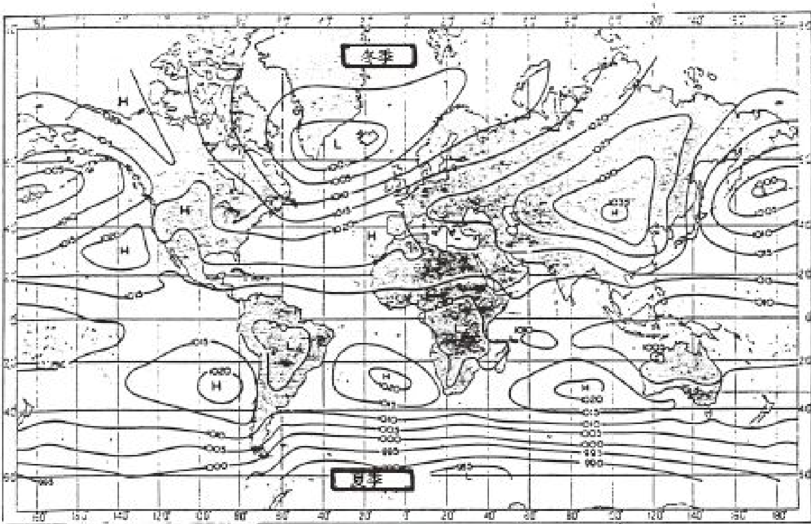
在主要大气带的过渡区，锋面活动最明显。但在某一个大气带内，来自不同源头的气团之间，或者来自相同源头的气团与因移动路线不同导致属性不同的气团之间，出现的锋面活动情形更复杂。

压力与风的分布

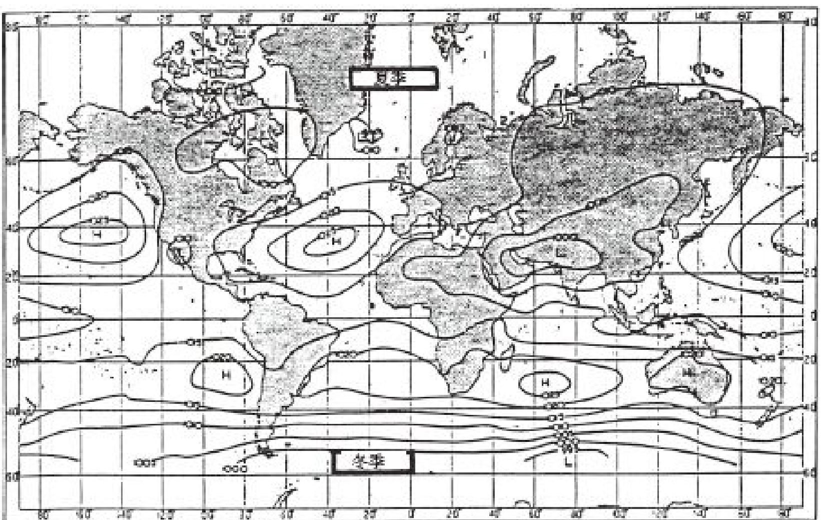
太阳的加热，以及随之产生的大气温度，影响了压力。压力是大气的重量作用于地球表面的结果。大气受热，体积膨胀，重量减轻，密度变小，因此表面压力减小；大气较冷，重量增加，密度变大，表面压力增加。

一般来说，表面压力是这样分布的：温暖、密度低的大气，如在赤道，表面压力低；在两极，大气寒冷、密度大，表面压力高。地球上海洋与大陆的地理分布，以及不同的受热影响，导致围绕地球交替出现高低表面压力带，如图8—2所示。看得出来，冬季低压区形成于温暖的海洋，高压区形成于寒冷的大陆；夏季高压区形成于温度较低的海洋，低压区形成于温暖的大陆。

用三维方式来展示表面压力图，就像地球等高线一样起起伏伏，压力分布形式类似于地形测量图上的波动，比如槽表示低压，鞍形与脊表示高压。



1月海平面平均表面压力



7月海平面平均表面压力

图8—2 1月与7月世界范围内平均表面压力

地表的大气从高压区流向低压区。低压与高压区界限普遍明显，不难构成一张理想的世界压力、风与高空大气环流分布图（见图8—3），但现实中情形要复杂得多。由于地球的旋转，大气并不从高压区直接流向低压区（科里奥利效应）[2]，这使得北半球风向右偏转，南半球风向左偏转。在北半球（见图8—4），低压区的气旋运动，使得风按逆时针方向循环运动，高压区的反气旋运动，使得风按顺时针转动；南半球则相反。因此高压区，往往被称作反气旋，低压区则经常被称作低压中心。在某些热带地区，来自高低压的旋转风暴称作旋风，由于来自不同

海洋，又称之为飓风或台风。带有强大气旋风的局部低压区，常在美国出现，称作龙卷风。

天气与地面压力分布密切相关，低压区容纳相对温暖、潮湿、更不稳定的大气，对应的则是多雨、多风的不稳定天气；高压区是寒冷、干燥、更稳定的大气，对应的则是晴朗、平静的天气。

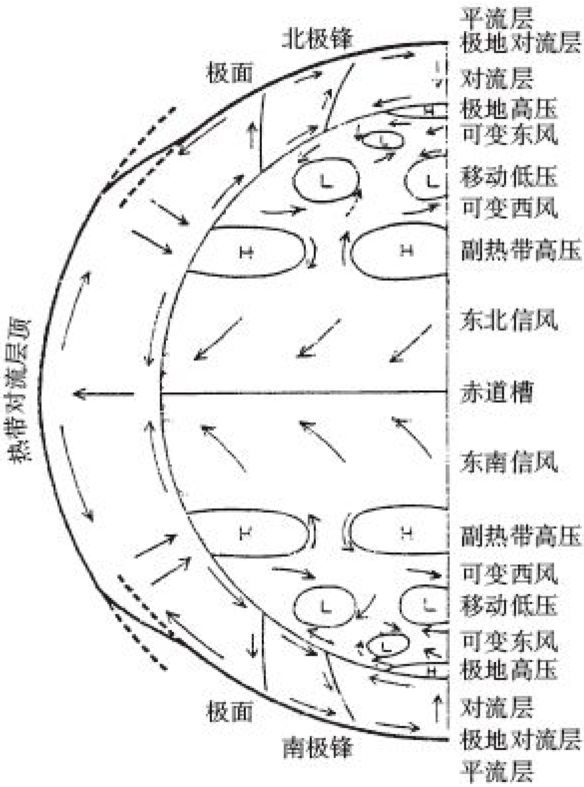


图8—3 理想的压力与风分布图

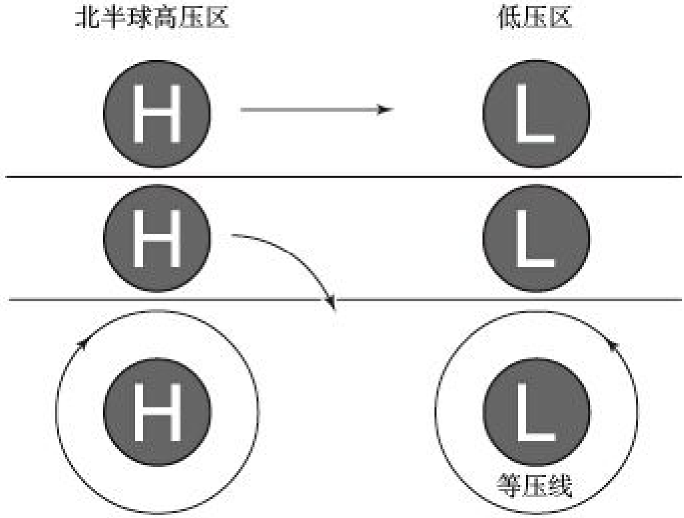


图8—4 北半球风的运动

对流层顶

太阳加热的另一个影响，是太阳光线越强，大气受热的厚度越大。高度增加1 000英尺，大气温度降低约2℃，这种降温现象到达一定程度后，温度保持在恒定的零下57℃左右。以设想的标准速率降温的大气低层称之为对流层。温度保持恒定（最后在更高高度开始上升）的大气层称作平流层。这两个大气层的分界线就是对流层顶。低层温暖大气上升进入上层寒冷的大气中，大气继续上升（温度降低）到对流层顶就不再继续上升，在其上温度保持恒定。

云是当湿空气上升时冷却，水汽在大气中冷凝形成的。对飞行员来说，对流层顶很重要，通常它是云顶的高度极限。对流层顶也表明是强风的最高高度。赤道受热的大气厚度要比极地大，显然，赤道的对流层顶的高度也要大一些。对流层顶的高度随季节而变化，夏季要比冬季高，但在赤道，它保持在55 000英尺左右。从冬季到夏季对流层顶的平均高度，中纬度在30 000～35 000英尺之间，极地在20 000～25 000英尺之间。

国际标准大气

大气条件的变化，是温度与压力（与密度密切相关）波动的结果。这种变化值要求一个标准大气条件作为界定的科学参照基础，在航空领域，可用来修正飞行仪表，测量飞机性能。

以中纬度的平均值为基准，国际民航组织把国际标准大气（international standard atmosphere，ISA）定义为温度15℃，压力1 013.2hP。

在航空领域，某一高度上的温度表示为与国际标准大气温度的温度差。比如，海平面的国际标准大气温度是+ 15℃，每1 000英尺降低2℃，35 000英尺的国际标准大气温度则为–55℃。如果指示的实际温度要比–55℃低，比如说为–60℃，35 000英尺的实际温度表示为国际标准大气–5℃，所有的性能图都要使用这种方法所表示的温度来查询。

压力表示为单位面积上的力，标准气象压力1 013.2hP，人们更熟悉的是14.7磅/平方英寸或1.03千克/平方厘米。压力也可用大气作用下的汞柱高来表示（即气压表），标准压力值为29.92英寸或760毫米汞柱。表面压力图显示平均海平面（涨潮与退潮的平均高度）的压力分布，把压力相等的点连接成线，称作等压线。如前所述，地球旋转导致风从高压向低压流动时发生偏转，风与等压线相关，一般而言，等压线指示风向线。风的强度则由等压线之间的距离来指示，等压线越近，风的强度越大。

天气的局部作用

前一部分介绍了普通世界气象，阐明了日照加热特效、表面压力与风的理论分布。但是在千变万化的天气情形下，情况极其复杂，位置与地形对气候的影响起到了重要作用。比如，某个位置的纬度，若不参照其地理位置，其气候图像会让人很困惑。内罗毕尽管靠近赤道，但海拔在5 000英尺，冬冷（夜晚很寒冷）夏热却很舒适。纽约与马德里尽管纬度相同（接近40° N），但受到北美大陆的影响，寒冷的冬季令人痛苦不堪，而马德里很少能见到雪。日本位于更南边（东京在35° N左右），夏季炎热，冬季来自北方的盛行风，横扫寒冷的亚洲大陆，带来冷空气导致冬天的严寒。因此，整个世界的天气变化很大，下面的小节更加密切关注飞行员感兴趣的天气。

云和雨

18世纪，伦敦的化学家与植物学家卢克·霍华德（Luke Howard）[3]首先用广泛使用的拉丁语描述把云分为10类。后来，气象学家在他的工作的基础上进行了扩展，现在有很多不同的云的形态分类，这里不详细讲述。它主要有层状的云，称为层云，与堆积成棉花样的积云。



大西洋中部上空堆积的巨型积雨云

雨云是雨层云（nimbostratus，Ns），与长期的小雨有关，积雨云（cumulonimbus cloud，Cb）与更强的阵雨有关。低空云层的混杂称作层积云。中高度（7 000~20 000英尺）的云要加上前缀“高”，如高积云、高层云；更高的云（高于20 000英尺）要加上前缀“卷”，如卷积云、卷层云。空中薄的一缕一缕的云称之为卷云。

云不仅由热对流形成，即暖气上升冷却导致水汽冷凝，而且还因大气上升而形成，如大气在丘陵和山区被迫向上抬升，冷气团在暖气团下面的锋面抬升，暖气上升。确实，大范围云的形成与锋面活动有关，锋面清晰的标志就是界线明显的云。冷凝达到大气饱和的程度时，就会出现降水，根据不同的温度条件，水分以雨、雪或冰雹的形式从云中掉下来。

机场天气报告中，曾用八分之几来表示云量，8/8 表示满天云，而现在则简化为少云、疏云、阴天。云底的高度用百或千英尺来表示。云底较低的情况下，云底离地的高度对飞行员很重要，飞行员需要知道飞机穿出云层的高度。

雷雨云是高耸的积雨云，通常形状像铁砧，对航空造成严重的危害。云里面，大量的水滴裹挟着空气从高空坠落又上升，速度可以高达5 000英尺/分钟，引起剧烈颠簸。机场附近，雷雨云能在云的边缘产生危险的下沉气流，通常应推延起飞让雷雨云过去。尽管受雷雨云影响的事故很少发生，因为如今的飞机建造得非常结实，飞行员还是想尽一切办法避开这样的云，使乘客的飞行更加平稳。机载气象雷达能在300海里远捕获积雨云，云里的大水滴能反射雷达信号（见图7—3）。雷达用红色来显示雷雨云，绿色显示其他云。水汽含量较小的云不在雷达上出现。

气象雷达对在云中的飞机，或在热带地区（那里巨型雷雨云可延伸到50 000或60 000英尺）夜间飞行的飞机避开积雨云活动有极其重要的作用。云里的摩擦可引起电的聚集，通过闪电来释放，发出巨大的响声（大气迅猛受热所引起），如果飞机被击中会受到损害。飞机受静电干扰也很危险，其经过特殊处理的轮胎，着陆时能向地面放电。悬挂在翼尖后缘的静电释放器，在飞行中把静电排放到大气里。在雷雨云附近，如有可能，飞行员要采取避让行动，如请求改变航路或飞行高度层，从距积雨云上风侧至少20海里的地方通过，来避免湍流尾流的下冲气流。有时，由于空中飞机多，情况不允许飞机偏离飞行航路，那飞机就不得不经受暴风雨的考验。极少数情况下，若无法避开严重的雷雨云，飞机可以返航。在颠簸的情况下，选择自动驾驶仪的“颠簸方式”可提升乘客的舒适性并减少自动驾驶仪的反应，飞行员会把飞行速度减小到300节的指示空速，以减小结构应力。

风

如前所述，从高压到低压的表面运动，由于地球转动引起了偏转，这就产生了风。

一位早期的气象学家白贝罗（Buys Ballot）提出了一条规律，是这样说的：“人背风而立，在北半球，则其左侧为低气压；在南半球，则其右侧为低气压。”高压区与低压区在世界的分布，形成季节性的风，其名称在帆船时代就为人所知。位于赤道南北的信风[4]，把贸易商船送到世界的远方。“咆哮西风”因其狂乱与强烈而臭名昭著，位于南纬40°，在赤道带地区减弱，那里风较为平静，称之为赤道无风带。地方性风也有名字，如法国的“密斯托拉风”、阿尔卑斯山的“焚风”和落基山脉的“切努克风”。它们是由山谷与山脉的地理影响而形成，引导风的运动，或者是因太阳对山坡加热效应不同而形成。机场的修建会密切关注地方性风，跑道需要建成逆风方向。

大风吹过山脉留下的尾迹中，波动幅度较大的气流能产生驻波，对飞机构成威胁。

高空中温度与压力产生影响，使风从高温区吹向低温区。赤道上空的大气要比两极温度高，高空中大气往往从赤道向南北流动。地球转动把北半球的大气向右偏转，把南半球的大气向左偏转，高空中世界各地的风通常向西流动（见图8—5）。同样，受温度与压力的共同影响，产生强劲的风速。此处风汇聚变成急速流动的气流，厚度仅有几海里，但宽度或许有数百海里，长度有1 000海里，这就是西风急流。它中心的风速往往达到200节，有时更大。经常在北大西洋上空发现西风急流（见图8—6），刚好位于对流层顶下的标准巡航高度。向东飞行可计划利用西风急流，向西飞行则要避开它。北大西洋高空风的平均速度向西为60节，向西横穿它会增加一小时飞行时间。从欧洲到澳大利亚，到中东时向西的风速为25节；从中东到印度，向西的风速为60节；从印度到

新加坡，向西的风速降低；从新加坡到达尔文变成了微弱的东风；从达尔文到悉尼，风的平均分速向西为60节。

晴空乱流由风切变引起，风的强度从一个地方到另一个地方不断变化。风速改变小至4节/千英尺会引起颠簸，6节/千英尺会导致严重颠簸。某些航图上用节/千英尺的数字标出了这些地区的风切变，给飞行员指出可能存在的颠簸。但它很难预报，有时平稳飞行时就遇到颠簸，而颠簸出现后又平稳了。在飞行中不可能探测到晴空乱流，外界大气温度的迅速变化能指示即将到来的颠簸。因此，明智的做法是坐着系好安全带，意外的晴空乱流可能导致乘客在客舱受伤。

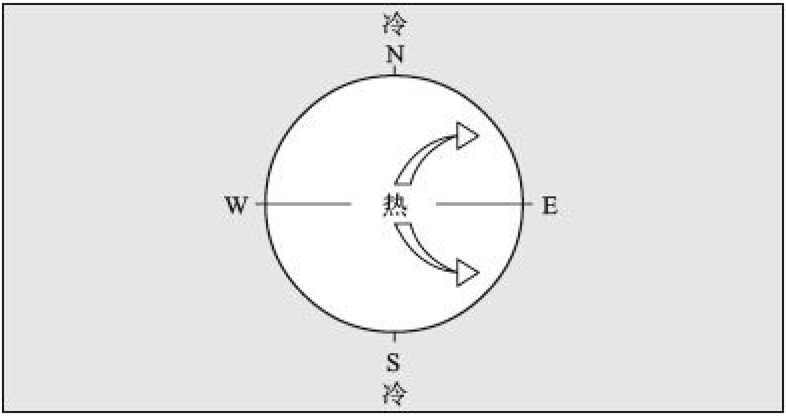


图8—5 世界高空盛行西风趋势

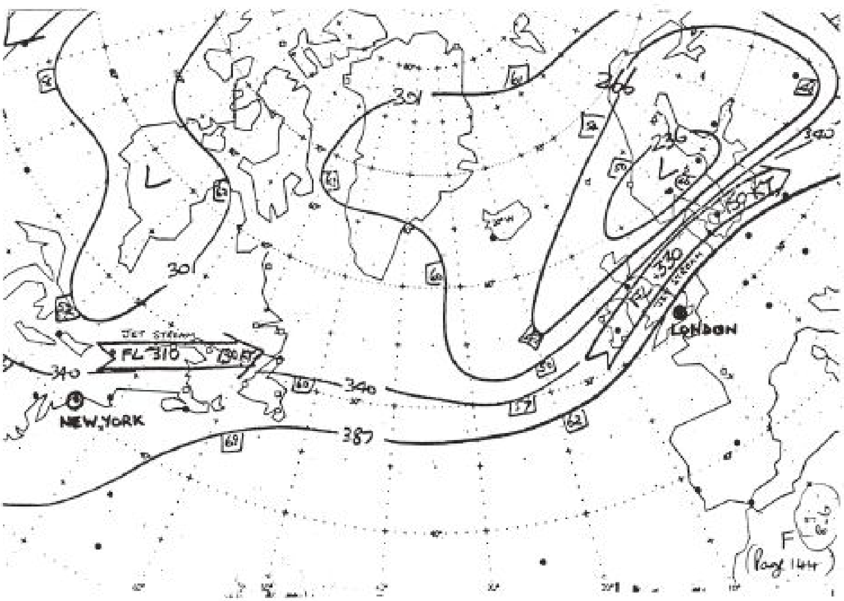


图8—6 北大西洋上空的喷射气流（由英国布拉克内尔气象局提供）

锋

前面讨论过世界范围内的锋面活动，这里将更详细地考察锋的形成和天气状况的关系。例如，沿北极锋面的活动清楚表明，不同性质气团的相互作用（见图8—7）。

邻近气团的运动沿锋线形成波状形态，冷气团进入暖气团，推动暖气团运动。冷锋突出部最终融合（或挡住）暖锋，迫使暖空气上升，形成“锢囚锋”，结果压力下降，形成低压。这些局部锋面最终沿风的大概方向以相同的速度破裂、分散、飘走。图8—7展示了一个局部锋面低压与等压线分布，重要天气图（见图8—8）清楚表明北大西洋上的极锋活动。

冷暖气团的锋线显示局部锋在地面的前进路线。冷气团挤进暖气团下方形成一个倾斜面，锋线标志着锋面与地面的相交线。穿过X–X的锋面的横截面展示在图8—7的侧视图中。在这两个锋面，暖气团被抬升，形成云，产生降水，但冷锋要比暖锋前进的锋面的坡面陡一些。随着暖锋的到来，温度上升很小，气压降低，出现细雨或连续性降雨。锋过后，风向改变，温度上升，下雨放缓或停止。冷锋的到来，风量增加，气压降低，但温度保持，或许有阵雨。锋过后，风量增加，变动剧烈，气压突然上升，温度下降，出现较强阵雨，或许打雷、下冰雹。

天气预报高度取决于对锋的运动分析与其前进方向的计算。可惜的是，锋变化多端，并不总是按预期的方式运动；它可能突然变向，或受高压区的前进而暂时停止。毫不奇怪，尽管有先进的技术，准确的天气预报依然很困难。

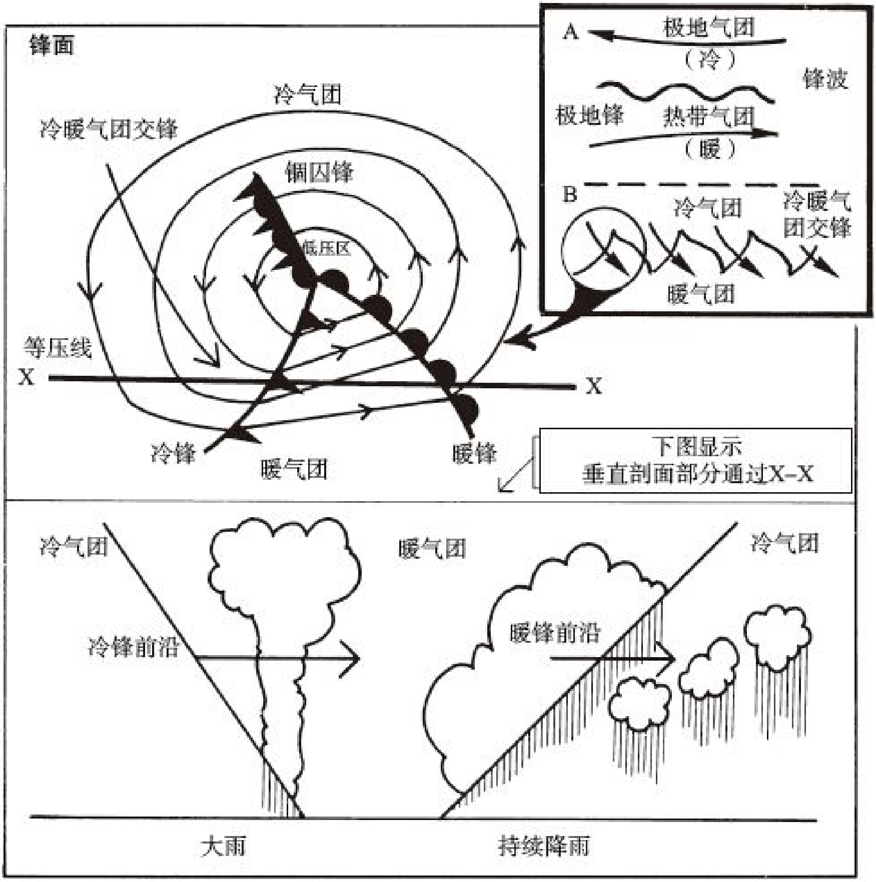

锋面
冷气团
冷暖气团交锋
锢囚锋
低压区
等压线
X
X
冷锋
暖气团
暖锋
A
极地气团
（冷）
锋波
极地锋
热带气团
（暖）
B
冷气团
冷暖气团交锋
暖气团
下图显示
垂直剖面部分通过X–X
冷气团
暖气团
冷气团
冷锋前沿
暖锋前沿
大雨
持续降雨

图8—7 局部锋

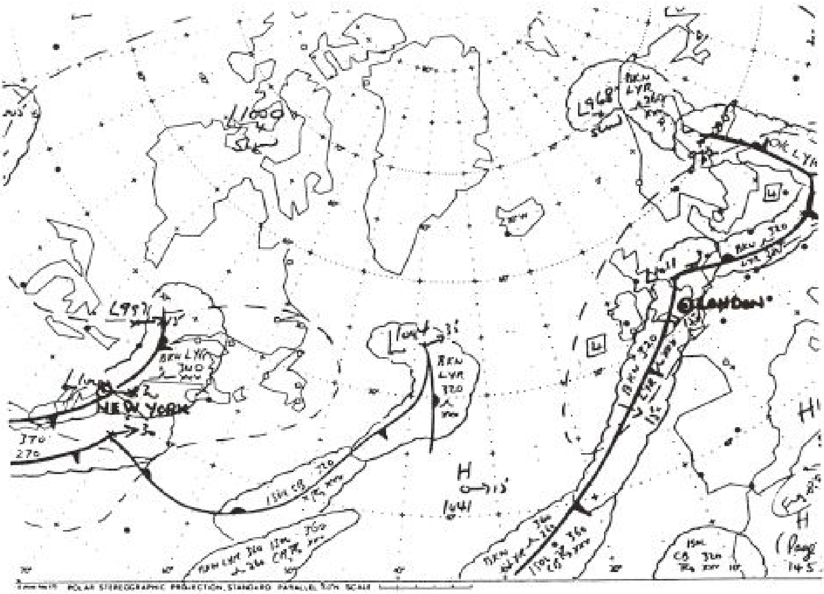


图8—8 北大西洋上空重要天气图（由英国布拉克内尔气象局提供）

能见度

机场的能见度对飞行员很重要，几乎在所有情况下，着陆时能看见一定距离依然很关键。机场的能见度报告用米、千米，或（在美国）英尺、法定英里。能见度较低时，用大气透视表来测量沿跑道的实际视程，检测大气的透明度，报告为某一跑道的跑道视程（runway visual range，RVR），如26跑道跑道视程400米。

尘埃或烟粒子形成的霾使能见度降低。雨或低云会形成薄雾，当大气中的水汽使能见度减小至1 000米以下时，雾就出现了。雾与污染物混合形成一种黄色浓雾，20世纪50年代颁布《清洁空气法》之前的伦敦人很熟悉它。

一种普遍的现象是低空薄雾或霾，降低了着陆的能见度。在高空中，垂直向下透过薄雾层看，可以清楚看见地面，但进近时，透过薄雾层斜着看，能见度明显减小，甚至低于着陆最低限制。

在印度的城市附近，早上出现薄的雾霭就会产生这种影响。实际上，太阳出来后霾消散很快。当报告能见度低于最低限制时，飞机往往在机场上空盘旋等待天气的好转。比如在孟买上空等待时，乘客可以清楚看见地面，这就难以向他们解释，飞机无法着陆是因为能见度不好。飞机下降进入薄的雾霭层时，乘客往往对能见度的降低惊讶不已，但飞行员却很了解这一现象。

机场的雾不再像过去那样成为问题，但即使有先进的设备，浓雾依然会使机场关闭。在浓雾条件下，所有飞机要正常使用盲降着陆与滑行技术，还有一段路要走。浓雾不散，乘客多半没有别的选择，只有在地面等待，或者选择其他交通方式。

折翅的人

奥格登·纳什[5]

我不乘飞机旅行，
我旅行乘火车。
有时，火车上，
我看见乘飞机旅行的人。
有时，我遇到
乘飞机遇到延误取消的人。
他们喜欢飞行的虚荣，他们唯一的谈资，
都使我迷惑不解。
我在公证人面前宣誓，
这群人的话老得掉牙。
他们认为必需解释，
为何碰巧乘火车，
因为在A等车厢，
他们似乎感到很落魄。
他们装腔作势地坐着，
紧抓公文包。
快速灌下威士忌，
他们本该已上飞机，
他们抱怨，他们愤怒，
现在本应到迈阿密。
他们皱着眉头，盯着手表，
又要了一瓶威士忌。
刚过小镇拉维，
他们本应到哈瓦那或挪威，
他们坚定地相信，
或许由于迟到，世界要崩溃。
过了一站又一站，
他们抱怨噪音，抱怨晃动，
这些被航空抛弃的人，
他们抱怨噪音，抱怨晃动。
有时，我在火车上遇到
乘飞机遇到延误取消的人。
那是坐火车唯一的麻烦；
有雾，起烟，下雨，
你遇到从机场赶来的人。

雾往往是由水蒸气在大气中冷却后，在地面附近凝结而成，可描述为地面的云。大气冷却，温度降低到大气不能再容纳水蒸气出现，然后

凝结产生水汽。这个温度就是露点。向大气辐射也会出现冷却。如果微风把冷却效应扩散开来，陆地在夜间变冷，温度低于大气的露点，早上就形成辐射雾，这在欧洲的冬季是普遍现象。（夜间有云，通过隔离辐射的影响，实际上可以防止下雾。）温暖潮湿的大气从寒冷的表面经过时，温度低于大气的露点，也会形成雾。这就是平流雾，在加利福尼亚的冬季就很常见，来自海洋的温暖潮湿的大气在温度较低的陆地扩散。

露点温度对飞行员也很重要，它表示大气温度低于这个温度就会下雾。在实际天气报告中，会引述温度和露点。大气温度降低到露点，报告为温度与露点相等，如温度8℃/露点8℃，下雾可能性很大。

冰

跑道和滑行道上有冰、雪，会造成很大的问题，这种条件下要减小起飞重量。被雪封住的机场，要设法保持跑道干净。跑道上的冰或雪积累到一定厚度（即干雪38毫米，湿雪或半融雪13毫米），则飞机不能起飞，但干雪达到10厘米还允许着陆。再大些的冰或雪会导致机场关闭。机翼上有雪，在空气动力学上是不能接受的，离场前必需刷扫或用除冰液来清除。

汽车司机对冰、雪道路上的驾驶问题很明白，在这样的条件下操纵大飞机也不容易。打滑的滑行道上，所有转弯减小到最大5节来防止侧滑，起飞和着陆要小心保持跑道中心线，尤其是在有风的条件下。

驾驶舱窗户和机身外部的仪表传感器都可以加温来防冰，从发动机引来热气用于发动机吊舱和机翼的防冰。发动机防冰作为一种预防措施经常被使用，但是，大型飞机很少遇到要求机身防冰。然而，飞行中重度结冰条件很危险。比如，超冷的水滴（大气中低于冰点还保持液态的水滴）形成的毛冰，接触到飞机就会冻结。接触时，还有一些水滴分散出来，这些水滴之间捕获了空气，就形成一种不透明现象，分散出来的水滴就形成半透明的明冰。当这种结冰现象很明显时，打开机身防冰，把热气引到机翼前缘可以除掉所有结冰。

[1] 法罗群岛为丹麦的一个海外自治领地，位于北大西洋海域，分布有18个小岛和岩礁，17个岛有居民。——译者注

[2] 科里奥利效应是法国物理学家科里奥利 1835年的研究结果，它解释了一个物体的不同部分在惯性作用下以不同速度运动的原理。——译者注

[3] 卢克·霍华德（1772—1864），英国皇家学院院士，19世纪英国制药学家、业余气象学家。——译者注

[4] 从副热带高压吹向赤道低压的风叫信风。在地球自转偏向力作用下，北半球形成东北信风，南半球形成东南信风。——译者注

[5] 奥格登·纳什（1902—1971），美国诗人，以其韵律怪异、结构奇特、含有淡淡讽刺意味的诗歌而成名。——译者注

09

空中交通管制

空中交通管制本身就是一门学问，也是一种职业，本书只从飞行员的视角来讨论。不论是飞行员还是管制员，“飞行规则”是安全飞行的最基本要求，所有人都需理解它。当然，此处并没必要列出所有的规则，特定的规则只有需要时才会提及。其他章节讨论过的“飞行规则”，此处不再重复。

航空界的度量单位

世界航空界的单位制各不相同，因此一直在协商希望达成全球标准。根据发明人来命名单位已为国际社会所接受，比如，摄氏度取代了百分度（取名于瑞典发明人安德斯·摄尔修斯），用百帕取代了毫巴（取名于法国物理学家布莱兹·帕斯卡尔）。

世界大部分地方使用国际民航组织的标准，但这也很混杂：高度用英尺，速度用节，风速用节，距离用海里，跑道长度用米（尽管经常使用英尺），重量用千克，温度用摄氏度，压力用百帕，能见度用米和千米，体积用升（在实践中，加油有时用加仑，加滑油则根据不同机型使用品脱、美国夸脱等）。美国保留的是改进的英制：高度用英尺，速度用节，风速用节，距离用海里，跑道长度用英尺，重量用磅，温度用华氏度，压力用英寸汞柱高，能见度用英尺与法定英里，体积用美加仑。在美国国内运行，遵循国际民航组织标准的飞机离场前需转换所有计算单位。俄罗斯和中国全部使用公制：高度用米，速度用千米/小时，风速用米/秒，距离用千米，跑道长度用米，重量用千克，温度用摄氏度，压力用毫米汞柱，体积用升。

管制空域

所有大飞机都在管制空域内运行，遵循仪表飞行规则（instrument flight rules，IFR），按规定向空中交通管制报送详细飞行计划，服从放行许可与空中交通管制指令，携带合适的无线电设备，同时，飞行员必须持相应的执照。

紧邻机场的控制空域称之为管制地带（control zone，CTZ，通常从地面到3 000英尺），扩大的大机场区域（或许包括一群机场，如伦敦的希思罗、盖特威克、斯坦斯特德、卢顿和城市机场）称作终端航站活动空域（terminal manoeuvring area，TMA）。航图标明了终端航站活动空域的垂直上限，如从2 500英尺到飞行高度层250。在美国，国家最繁忙机场周围的空域（如纽约的纽瓦克、拉瓜迪亚、肯尼迪机场）称作B类空域，从地面延伸到10 000英尺。B类空域的边界是个别制定的，通常包括一个限定的地面活动区，以及上空两个或两个以上的限定层。通

常，随高度增加上层扩大，有些情况下，大机场的B类空域像倒置的结婚蛋糕。在美国，从18 000英尺到60 000英尺叫A类空域。不太繁忙的机场周围，从地面到4 000英尺的空域，叫C类空域，其边界也是个别制定。

交通密度较高的某些大的区域，指定为管制区（control area，CTA），航图上明确划定了边界，标明了空域的垂直上限。大西洋和太平洋上空的管制区称作海洋管制区（ocean control area，OCA）。高于20 000英尺的空域（世界各地高度不同）称作高空空域，这些高度的管制区称作高空管制区（upper control area，UTA），如法国高空管制区飞行高度层195~660。在很多国家，所有的高空空域管制到非常高的高度（如上述法国的高空空域），或者到无限高。

往来于世界各地的空中高速公路称作航路，最宽至10海里，至今常常由无线电信标台标明。所有的航路都为管制空域，航图标明了垂直上限，如3 000英尺到飞行高度层460。国际民航组织使用字母和数字代码来标明航路，如A10、G415、B15、R365、W4等。高空空域内的航路加上前缀“高”（upper），如高空B4（UB4）。在北美，包括美国与加拿大，低于18 000英尺的航路称作甚高频全向信标航路，以V打头，该高度以上的航路称作喷气航路，以J打头，如V949、J121。

世界所有的空域被分为大的区域，称作飞行情报区（flight information region，FIR），高空空域为高空飞行情报区（upper flight information region，UIR），航图清楚标明其边界。不同国家两个飞行情报区的边界沿国界划线。飞行情报区或高空飞行情报区内，如前所述，仅有管制空域内运行的飞机服从空中交通管制与仪表飞行规则。管制空域之外，其他飞机通常可以根据飞行员意愿自由来往，但还是要遵循基本的“飞行规则”。

在北大西洋，由于有时单向交通流量大，数个近似平行的北大西洋跟踪系统在运行，它们能充分利用最有利风向或者避开最不利风向。计算机算出最好的航行路线，每天公布两次可用的航迹。北大西洋跟踪系统内所有高于飞行高度层280的空域，受到大西洋两岸的空中交通管制。

间隔

现代飞机都装有飞行中防撞探测设备，会给飞行员警告，但机组依然严重依赖空中交通管制来保持飞行间的间隔。在某些空中交通管制中心，也有“冲突警戒”设备给管制员指出潜在的冲突。可惜的是，有时确实出现飞机间以不可接受的距离接近，在这种情况下，有关飞行员要填写空中危险接近报告。空中交通管制的主要功能，是保持所有飞机之间的安全间隔。飞行中飞机间隔的可接受最低限度，定义如下。

在由雷达管制的机场，以相同初始航迹离场的飞机，最小间隔为2

分钟，不同航迹为1分钟。（小飞机在大型喷气飞机后起飞，间隔增加到10分钟，避开前面离场飞机留下的尾流。）由于速度与路线的不同，等待起飞的飞机或可不按严格的顺序离场。在雷达管制的航路上，飞机间的纵向间隔通常为30海里，但美国将其减小到20海里。尽管民用雷达可用的距离接近200海里，世界大部分地区（大西洋、太平洋、非洲、印度和澳大利亚的部分区域等）还没有航路雷达，这种情况下间隔增加到10分钟或15分钟，在有些情况下，根据当地规定飞机间隔增加到20分钟。在目的地的终端航站活动空域，雷达间隔减小到5海里，在机场附近3海里内进近，着陆间隔为1分钟。（在大型喷气飞机后着陆的小飞机，间隔增加到6海里，也是为了避免尾流颠簸。）

在大多数航路上，双向飞行的飞机和垂直间隔根据半圆规则来保持间隔，给东向和西向飞行分配具体的高度层。在北大西洋跟踪系统，使用缩小垂直间隔，批准相同航迹飞机的垂直间隔是1 000英尺，临近航迹上的飞机可在同一高度飞行。相同航迹的纵向间隔为10分钟，航迹之间的间隔为60海里，因此，相同高度、相同方向的不同航迹上的飞机，横向间隔为60海里。要求紧急下降，或返回基地时，飞机沿航迹之间的中间位置飞行。

交通冲突与防撞系统

交通冲突与防撞系统是一种机载冲突与避让系统（见图9—1），基于飞机与飞机间的应答机问询。

交通冲突与防撞系统使用S模式应答机来运行，提供其他装有应答机飞机的位置信息，并不要求其他飞机具备S模式能力。只有在潜在的碰撞危险达到一定级别时，飞行员可采取避让行动而无需空中交通管制许可。

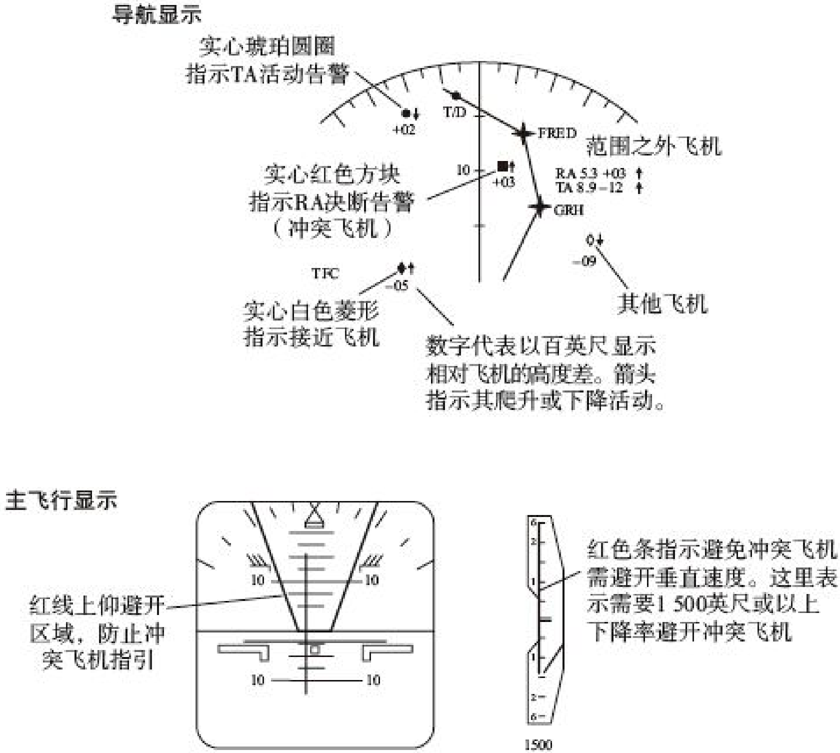


图9—1 导航显示与主飞行显示——交通冲突与防撞系统的显示

交通冲突与防撞系统设备每秒钟扫描一次，最小范围是前方15海里，后方7.5海里，测量任何“入侵”飞机的距离与接近速率。接着评估当前飞机运动，算出引起潜在冲突的趋势。波音777上，问询飞机在导航显示器上显示出来，附近的其他飞机根据其远近以各种符号来显示。每个符号旁边，用数字表示高于或低于问询飞机的高度（如＋09　900英尺高；–03　300英尺低）。此外垂直速率超过500英尺/分钟时数字旁还有箭头向上或向下指示，表示目标飞机正在爬升或下降（如–20↑，飞机在下方2 000英尺，爬升速率大于500英尺/分钟）。附近飞机距离大于5海里时，称为“监视目标”，在交通冲突与防撞系统屏上显示为白色空心菱形。在5海里范围内时，它显示为白色实心菱形，入侵飞机称作“接近目标”。接近目标与问询飞机之间的接近时间表明有潜在威胁时，该符号变成琥珀色实心圆，并给出“目标提示”信号。它发出音响警告　“Traffic, traffic”。在最小接近时间，情况很危险，目标飞机成为即时的威胁时，“决断提示”发布。该符号变成红色正方形，音响警告命令应采取避让行动，“Climb, climb”或“Descend, descend”。同时，它叠加在主飞行显示器上，用红线把一个或两个区域包围起来，表明需避免的姿态。垂直速度指示器也给出爬升与下降速率引导，使其与目标保持安全距离，并用垂直的红色条给出要避开的爬升或下降速率。预防性的语音警告也会发出，如“监控垂直速度”。在这种极端情形下，飞行员直接依照交通冲突与防撞系统指令采取行动，无需参照空中交通管制，当然他们必须要告

知对方，飞机正在按交通冲突与防撞系统警告要求飞行。



伦敦希思罗机场塔台

空中交通管制员

管制空域内的所有飞机在任何时候都受到空中交通管制人员的直接监管。管制从起飞机场的地面活动开始，管制员（称作“地面”）与起飞和着陆管制员（称作“塔台”）一起，坐在高高的控制塔台里，一览跑道与机场周围区域。有平行跑道的机场，两位“塔台”管制员在不同频率上运行，一位管制员负责一条跑道的起飞，另一位管制员负责平行的另一条跑道上着陆的飞机。



塔台管制员监控着陆飞机

进近管制员（称作“进近”或“指挥员”）在灯光很暗的房间里（有时位于机场管制员塔台的下面）使用雷达来指挥机场附近的着陆飞机，最远距离达50海里。在有些机场，离场管制员（称作“离场”）与进近管制员在同一房间里，有些位于离场机场附近的管制中心。区域管制员（由某个区来称呼——波士顿、纽约、伦敦、苏格兰、法国等）在主要的空中交通管制中心工作。

离场管制员指挥机场附近离场的飞机，然后把飞行移交给下一个航路区域管制员，后者也处理穿过他所在扇区航路上巡航的飞机。飞机沿航路飞行，从一个管制区的扇区移交给另一个扇区，从一个管制员移交给另一个管制员。管制员用雷达或飞行员的位置报来监控飞行进程，用无线电在某个管制扇区预先分配的频率上与飞机保持联络。在主要的空中交通管制中心内，覆盖某个区的管制员按顺序并排而坐。离开扇区，管制员告知飞行员改变无线电频率，飞行员选定下一个频率，通过呼叫下一个在线的管制员重新建立联系。到达空中交通管制中心管制边界，管制移交到航路上相邻的管制中心，从扇区到扇区，从管制中心到管制中心，在整个飞行中不断重复。主要空中交通管制中心之间可通过地面电话联络，但通常临近管制区有长期协议，允许无需联系就可移交飞行，只要飞机在批准的高度，在雷达航向上偏离航路不超过30°。

飞行计划

管制空域内的所有航班，在发动机开车前一定时间内，必须向离场机场的空中交通管制递交飞机计划。飞行计划包括以下详细内容：离场机场、目的地机场、备降机场、航路、请求的飞行高度层、飞机呼号、飞机登记号以及飞机型别。还要给出预计离场时间（estimated time of departure，ETD，通常为时刻表上的离场时间），基于预计离场时间的

航路上预达某个点的时间，以及其他辅助信息，如真空速、马赫数、选择呼号、携带的无线电设备。飞行计划详情用电报传给航路上各个空中交通管制中心。

当然，飞行计划只是请求某个航路和飞行高度层，通常定期航班的批准是个例行程序。但有时起飞前，飞行员请求放行许可，表明飞行计划被接受，或者有时因飞行冲突而不被接受，其他航路申请需要重新获得许可。飞行员接收到放行许可的时间，每个国家都不同。但无论如何，空中交通管制是在接近起飞时间时才给出，以便与其他飞机协调。离场后，飞机的实际起飞时间电报发给航路上各个空中交通管制中心，预计报告点时间也相应更新。

实践中，大多数喷气飞机的飞行都是定期航班、定期运行，公布的离场时间与航路很少变动。当然，离场延误不可避免，航路上，预料不到的风使飞机或早或迟到达报告点，扰乱飞行计划的预先设定。因此，尽管管制中心预先收到详细的飞行计划信息，每位管制员在飞机到达时还会有相应处理，必要时重新给出航路或改变飞行高度层来保持间隔。在欧洲与美国拥挤的空域，飞机在不同航线构成的航路网络中飞行，高度与速度不同，同一航路还有对头飞行的飞机。交叉航路可能意味着抵达交汇点的飞机加速或减速，或由雷达引导（如给出航向转出来）来保持间隔。离场时起飞重量很重的飞机爬升速度很慢，要花较长时间穿过拥挤的空域才到达巡航高度，而此时其他飞机正在请求下降到目的地机场的许可。与此同时，在这些混杂的各自高速前行的飞机之间，始终要保持飞行间的合适间隔。在高度拥挤的世界空域，唯有使用计算机与雷达，还有技艺精湛的管制员才能完成这样的任务。

放行许可

在离场机场，最初的放行许可包括标准仪表离场航路与应答机编码，这样可保持飞机远离噪音敏感区。（标准仪表离场随使用跑道与飞行航路的变化而不同。）通常，管制员说“放行到目的地机场，飞行计划的航路”表明空中交通管制接受了递交的航路计划申请。从理论上讲，初始许可仅包括离场国家之内的航路段，穿越国界时要求飞行员重新获得航路许可，友好国家之间的飞行通常无需这样的协议。但在世界很多地区（如中东、远东、阿拉伯半岛、非洲等），某些国家对他们的空域非常敏感，进入空域前要小心获得前行的许可。

在很多地区，民航空中交通管制中心依然没有航路雷达，管制员唯有依靠无线电位置报来监控飞机的进程。比如，在这些地区，飞机需要用无线电报告，看见冲突飞机已向相反方向通过后，才能改变高度。如果两架飞机均未证实目视发现，需要位置报告表明飞机已有足够距离才能给出爬升或下降许可。另外，在一些把安全看得很重的地区，尽管相关的空中交通管制中心已经收到飞行计划详情，知道飞机很快到达，但依然要求按规定请示办理。在世界大部分将要发生冲突的地方，这样的

措施或许可以理解，但往往很耗时且无必要。

众所周知，飞机未经通知进入外国空域，会遇到战斗机拦截。过去20年间，至少有两次军机向民航客机开火，使其迫降。基本的拦截程序包括，拦截战斗机位于被拦截飞机前方，摇摆机翼，接着慢慢转向飞机航道，意思很简单，那就是“跟着我”。在机场上空盘旋，放下起落架，表示被拦截的飞机必须在那个机场着陆；战斗机突然向上，表示被拦截飞机可继续前行。拦截机在被拦截飞机旁边飞行，摇摆机翼，意思是“执行指令”。被拦截飞机摇摆机翼来回应，表示明白指令，飞行员将执行指令。如果在夜间，两架飞机打开航行灯，同时摇摆机翼。在极少数情况下，当爆发公开的战争时，如海湾战争期间，大片空域直接关闭，导致飞行绕道很远。

北大西洋由于交通密度大，也是一个需要重新许可的地区。递交的飞行计划包括请求某个航迹与飞行高度层，飞机在航路上飞到航迹加入点时，重新获得前方许可。向西飞行要从英国的香威克管制区获得许可，向东飞行要从加拿大的甘德管制区获得许可。装配有飞机通信寻址与报告系统的飞机，可使用数据链来获得许可，但必须用无线电来证实其详细情况。在航路上进入加入点时，飞机要与上述管制区建立联系，重申所请求的航迹与飞行高度层。把预计到达加入点的时间传给计算机，算出可用航迹与飞行高度层。同时，飞机前往加入点进入请求的航迹，通常分配来作穿越之用，但并非总是在所请求的飞行高度层。所请求的航迹出现拥挤时，可分配另一个航迹，要求飞机穿越之前改变航路（通常在雷达监控下）到新的加入点。当然，在飞机上，后续的输入工作包括所请求的航迹、改变后的航路飞行计划和新的航迹都需用人工修改。

基本空中交通管制程序

从出发机场到目的地机场的所有管制员都会收到某个航班的详细飞行计划，助理人员将其压缩进飞行进程单上，如图9—2所示。计算机化的雷达屏幕显示这些正在使用的信息（稍后再讲）。飞行进程单安放在一个金属壳的垫板上，管制生效时，将其依次放置在带槽支架的顶部。比如在离场机场，开车时首先联系“地面”，地面管制员承担起管制责任，把飞行进程单放在槽架的“地面”顶部。根据飞机活动状况，“地面”给出启动许可，也可能推迟来缓解飞机流量，以减轻航路上的拥挤。从欧洲机场穿越欧洲大陆上空前往繁忙航路的离场飞机，可能接收到“安排的离场时间”，航班必须在这一时间升空，否则就会延误。其他请求开车的飞机在地面管制的指挥下时，它们的飞行进程单在这个连续的流程中依次轮置到槽架的顶部。有些机场的放行许可是从“地面”管制频率收到的，还有一些机场则在滑行前10分钟或20分钟时从独立的“放行许可”频率收到。小机场则由“塔台”发布放行许可。

“地面”发布滑行指令告知使用的跑道和等待点等信息，并在塔台里

从高高的位置监控飞机在机场的滑行。“地面”还管制滑行引导灯和跑道灯光系统。快到使用跑道等待点时，“地面”指示飞行员联系“塔台”。这时，飞行进程单放到槽架的底部，取下来交给“塔台”。现在“塔台”承担起管制责任，飞行进程单放到“塔台”槽架的顶部。（随着管制进程的继续，安放在金属垫板上的飞行进程单就像接力赛的接力棒一样，随飞行进程从一个管制员传给另一个管制员。）条件合适时，飞机被许可起飞。

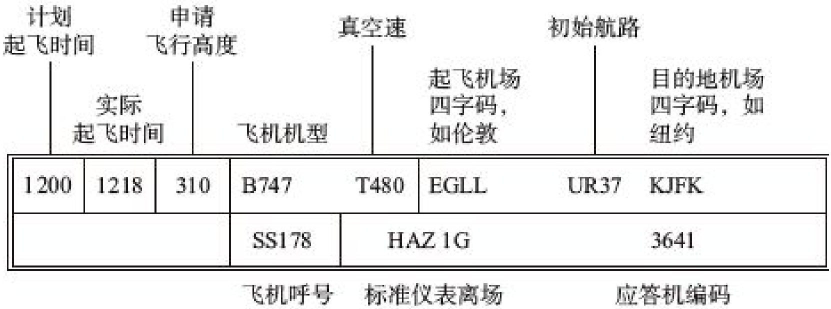


图9—2 飞行进程单

起飞后不久，“塔台”指示飞行员改变频率，把管制移交给“离场”。“塔台”把飞行进程单交给位于塔台下方的离场管制，有时通过一个自上而下的管道来传递。“离场”位于当地管制中心时，通过地面电话把起飞前的每一阶段告知离场管制——飞机在等待点、飞机上跑道、飞机正在起飞，“离场”在飞机升空后准备好接收。现在“离场”握住“接力棒”，监控着荧光屏上离场的飞行，需要发布雷达引导航向指令来避让，如果没有影响的飞机，许可起飞的飞机会爬升到更高的高度。在机场邻近区以外，加入航路时，区域管制员承担管制责任，飞机从一个空中交通管制中心飞往另一个空中交通管制中心。

在目的地机场，从航路到机场邻近区通常有标准终端进场航路，现在大多数主要机场都有。下降时，飞机沿着标准终端进场航路从航路下降，最后一位航路管制员许可飞机到最后进近点，它通常有一个无线电信标台指示位置，距离机场有20海里左右。这些点称作等待点，通常每一个扇区有一个，标明许可的飞行边界。如果遇到着陆延误，要求飞机在这些点等待，通常是一个右转的赛马场航线，被称为分层盘旋等待航线，飞机在相互间隔1 000英尺（从7 000英尺往上）的高度盘旋等待进近许可。下层高度空出后，得到下层高度的许可，飞机离开等待点沿指定的航向下降到下一高度。这时，进近管制承担指挥责任，由雷达引导飞机进入仪表着陆系统。建立仪表着陆系统后，管制转到“塔台”，由“塔台”发布着陆许可。着陆后，安全脱离跑道，“地面”引导飞机到停机门。

马斯特里赫特空中交通管制中心

在世界拥挤的地区，如欧洲与美国，前面描述的基本空中交通管制程序被使用计算机化的雷达系统的现代空中交通管制中心所取代，通常还保留某些人工系统以防计算机失效。世界最先进的系统是位于荷兰东南角的马斯特里赫特的欧洲空管空中交通管制中心。它的呼号为“马斯特里赫特区调”，该中心负责比利时、卢森堡与德国西北的高空空域，是欧洲航路网络最繁忙的一个地区。

以这个正在使用的系统为例，我们来跟随一个假设的飞行进程，世界航空公司179（呼号Skyship179），从伦敦管制穿过马斯特里赫特区调，在比利时海岸的Koksy（Kok）航路点进入，沿马斯特里赫特西扇区的高空G1（UG1）航路，马斯特里赫特东扇区的高空A24（UA24），前往卢森堡附近的Diekirch（Dik）航路点（这条航路可在图4—8找到）。UG1 横贯马斯特里赫特区调lA扇区（区调频率132.275 MHz）与区调3A扇区（区调频率133.35MHz）。



马斯特里赫特ATCC运行室概貌（欧洲空管提供）



运行室左边的管制席位是布鲁塞尔扇区，操纵台后部是汉诺威扇区（欧洲空管提供）



布鲁塞尔扇区，规划管制席位展示的是显示控制台与飞行进程单槽架（欧洲空管提供）

主任管制员在助理管制员的辅助下负责每个扇区，同时还需要规划管制员与飞行数据助理的配合，后者把飞行计划详情输入计算机，协调飞行避免航路拥挤。（由于工作压力大，管制员每两个小时左右要求从显示控制台离开休息一次。）每位主任管制员、助理管制员、规划管制员都有一个如图9—3所示的显示控制台。圆形显示器屏不是雷达屏，而是一个计算机生成的图像，使用源自各个雷达站经过处理的信息。雷达站之间交叉检查保持信息的准确，一个雷达站失效，该显示依然能运行。管制员定期管理同一个扇区，不用识别也熟知显示屏上的航路与报告点。多数飞行每天按计划在相同时间离场，管制员很熟悉它们的预达时间和线路。

圆形显示器屏显示垂直范围在16 000～45 000英尺的装有应答机的飞机，也可选择显示一次雷达回波。星形或圆点用来识别军用飞机。圆形显示器屏上，每一架飞机由一个位置符号显示，包含一个小正方形和其尾部的三画显示之前每5秒的位置。这个尾部显示称作“速度矢量”，表明飞机飞行的方向，长度表示飞行速度。正方形旁边有一个数据标牌，显示飞机呼号、应答机指示的实际飞行高度层。因此，管制员能察觉方向或飞行高度层的最细微变化。每个位置符号与数据标牌每隔5秒由明变暗交替出现，与飞机的位置同步。飞行员按压应答机的“识别”按钮后，位置符号正方形会变大并闪30秒，这就可明确识别飞机。圆形显示器屏上的运动与无线电对话被连续不断地记录下来，出现事故时可回放。

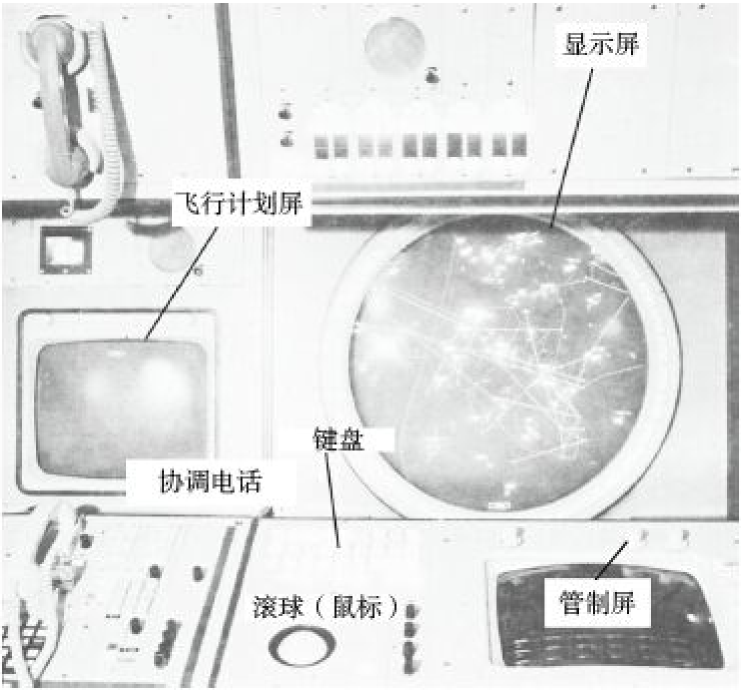
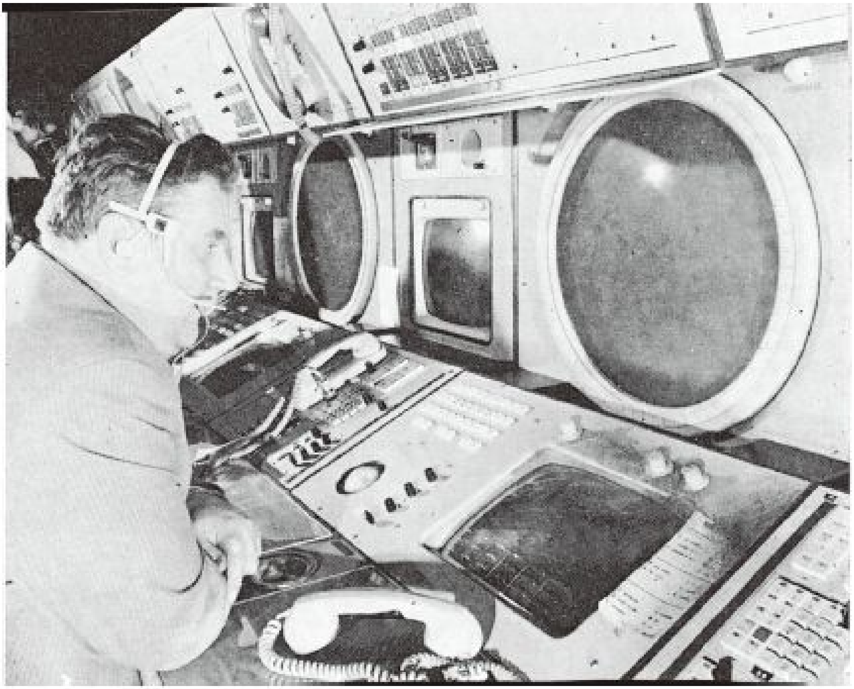


图9—3 ATC显示控制台（欧洲空管提供）

圆形显示器下面的控制屏幕展示扇区内管制扼要的飞行计划详情（类似于槽架上的飞行进程单）。飞行计划屏的左边显示所选飞行的详细方向计划信息，包括沿航路位置报告点的预达时间，以及标准的飞行计划信息（呼号、离场机场、飞行型别、飞行高度层等）。每6个小时向计算机提供实际高空风速，修正来自飞行计划的飞行真空速，获得近似地速，用于预达时间的计算，并根据需要更新所有的时间。

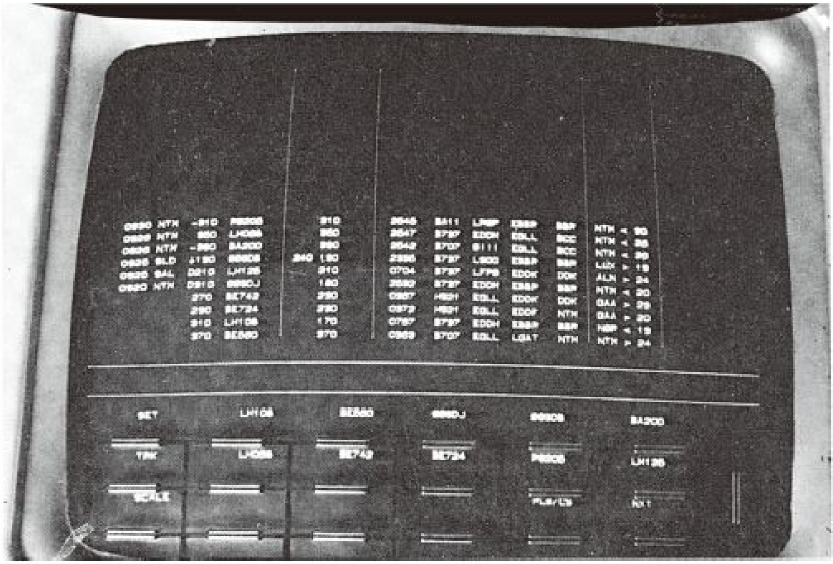


布鲁塞尔扇区的一个雷达管制员席位（欧洲空管提供）

滚动球可在圆形显示器屏上调动图像，类似于电子游戏，把飞机引导至指定的点可获得航迹与距离信息。使用滚动球时，首先把光标放到目标上，并按下按钮。可把光标移到任何一点，飞机与光标间的方位与距离就会一直显示。

离场前，马斯特里赫特收到用电报传来的Skyship179的飞行计划，如果是定期航班，应该已经输入计算机。如果没有，飞行数据助理把相关详情输入计算机。航路穿过伦敦管制区，位于西德雷顿的伦敦空中交通管制中心传给马斯特里赫特这些内容：管制区边界（多佛与Koksy之间的一个点）的预达时间、飞机的实际飞行高度层（如果飞行是从伦敦离场，要爬升的高度）和分配的应答机编码。马斯特里赫特的飞行数据助理把这些最终的详情输入计算机。如果马斯特里赫特在某一高度接收到Skyship179有问题，会直接通过地面电话联系来讨论这个问题。

预达边界10分钟前，Skyship179扼要的飞行计划详情出现在马斯特里赫特主任管制员的管制屏幕顶部。飞机进入马斯特里赫特应答机范围时，计算机通过比较飞行计划计算的位置与接收的雷达位置来核实飞机位置，然后在圆形屏幕上显示出来。管制员会清除掉出现的任何差异。如果发现是一致的，位置符号与数据标牌重复闪烁，自动显示飞机位置，直至接收管制。接近边界时，伦敦空中交通管制中心指令Skyship179在132.275 MHz上呼叫马斯特里赫特。



控制屏显示扼要的飞行计划详情，取代飞行进程单（欧洲空管提供）

一旦建议通信，马斯特里赫特主任管制员承担起该飞行的责任，在计算机控制台上键入相应的选择器输入按钮。这时，闪动的位置符号保持稳定，管制屏幕顶部飞行计划详情与已经显示接受管制下的其他航班结合到一起；同时，飞行计划屏幕上出现完整的飞行计划详情与航路上报告点的预达时间。现在，Skyship179在管制监控下继续前行，穿过马斯特里赫特1A扇区，在132.275 MHz保持守听。

预计转换到3A扇区前10分钟，扼要的飞行计划详情会出现在下一个主任管制员的管制屏幕上，运行频率是133.35 MHz。Skyship179的位置符号在3A扇区圆形显示器屏上闪动，在转换点前3分钟开始管制区内的管制移交。飞行员接到132.275 MHz上的管制员指令，选择133.35 MHz与下一个管制员建立联系。3A扇区管制员承担管制，如以前一样把所接受的飞行键入计算机。位置符号与数据标牌再次稳定同步，飞行计划详情如前面描述的那样出现。在1A扇区管制员的显示屏上，位置符号变暗，所有的飞行计划详情从屏幕上消失，这表明管制已经移交。穿过3A扇区现在由133.35 MHz的管制员监控。在管制边界，Skyship179在德国西部的卡尔斯鲁厄移交给莱茵空中交通管制中心，如此一直沿空中交通管制中心到目的地机场。

空中交通管理与自动相关监视

自动相关监视（automatic dependent surveillance，ADS）是高级空中交通管理（air traffic management，ATM）与未来空中导航系统导航概念的基础。未来空中导航系统确立的技术标准与要求，综合了基于

卫星的通信与用于空中交通管理的导航与监视系统。尽管名为“未来”，未来空中导航系统在太平洋地区已经使用几年了，如今大西洋地区也在使用。在可用范围内，通过使用甚高频数据链网络的双向数据链来通信，偏远地区使用卫星通信，定期自动发射飞机识别、位置报告与高度。机载飞机通信寻址与报告系统用于数据链信息的交换与管理。惯性基准系统的激光陀螺，与使用GPS的卫星导航一起提供准确导航。在可用范围内，用地面无线电导航辅助设施与/或GPS来交叉检查并更新惯性基准系统导航。在偏远地区，GPS卫星导航系统是唯一证实惯性基准系统位置的手段，把它所提供的位置报告整合用于准确的空中交通管理。空中交通管制中心在所有飞行阶段，通过自动飞机识别、位置与高度报告，能够监控飞机的活动；飞机在可用范围内，使用雷达询问机载S模式应答机来证实位置；飞机在偏远地区，使用GPS来恰当地核实惯性基准系统的位置。自动数据链通信与导航功能称作自动相关监视，即使在没有雷达的偏远地区，它也能提供准确的监视和高效的空中交通管制的管理。这就不再要求飞行员与管制员之间的无线电语音通信，而只是作为备用，或在紧急情况下才使用。飞机使用机载交通冲突与防撞系统也能监控自己与其他飞机的间隔。

自动相关监视的功能已经使得太平洋地区的飞机间隔标准放宽，横向间隔缩减了一半到30海里，纵向间隔减小到50海里，基于时间的纵向间隔将减小到10分钟以下。间隔标准的放宽，连同引入的缩小垂直间隔，增加了交通容量，缓解了拥挤，节约了燃油和时间。在大西洋，航迹间的横向间隔也减小了一半到30海里，交通容量增加了一倍。

现有的航路系统将无法应对预期的交通增长，未来空中导航系统的发展是区域导航（area navigation，RNAV）的延伸。区域导航提供大致平行的交叉航迹网络，飞机不再被限定在航路上预先规划的一段接一段的线路上，而是沿网络前行。未来空中导航系统技术的最终目标是超越区域导航进入自由飞行。

自由飞行的概念是指所有飞机能在所请求的时间内自由地从A机场直飞到B机场。空中交通管制利用四维的精确性（即精确的横向、纵向与垂直间隔，加上时间管理）来管制并监控与中心用数据链连接的飞机。管制员也能把飞行轨迹上传到飞行管理计算机。飞机能准确地安排从门到门的时间，没有延误地推出、滑出、起飞。飞行以最佳高度层沿直线航路前往目的地机场，再一次没有延误地开始进近、着陆、滑回、直接停至到达门。使用GPS与/或微波着陆系统，以及地面活动雷达避开大雾引起的延误。这种难以置信的飞机活动网络将由先进的、自动的未来空中导航系统技术来安全地管制与监控。

10

飞行机组

从世界范围来看，飞行机组的背景非常广泛且各不相同，他们从各个不同渠道参与航空公司的飞行。很多人从空军开始飞行训练，或者高中毕业直接进入飞行院校开始飞行训练，还有些人获得大学本科或以上学历后开始飞行训练，还有少数人受飞行的诱惑而放弃原有的职业。大航空公司通常为选中的候选人提供资助，使其接受飞行训练学校的规定课程，在那里获得商业飞行员飞行执照通常要一年时间。少数人自费去上批准的飞行训练学校。世界各国的空军中完成军事训练的飞行员也是航空公司的后备人员，他们开始航线飞行前也要获得民航执照，很多人自费获得这些执照。

过去只要通过积累飞行小时，不用上课就可获得商业飞行员执照（commercial pilot’s licence，CPL），但自《联合适航条例》（Joint Airworthiness Requirements）颁布以后，这条途径不再可行。《联合适航条例》试图创造一个世界范围内的标准。大部分欧洲国家的航空局在这个组织中都有代表，联合建立了该条例。欧洲外的很多国家也加入进来，最终把该要求整合进他们自己国家的法律之中。要获得JAR–CPL或JAR–ATPL，必须完成综合课程或模块课程。综合课程是由认可的飞行训练组织提供的一个专职地面课程与飞行训练。也可利用模块课程，它为持有私人飞行员执照（private pilot’s licence，PPL）的人们而设计，这些人不想参加全职的综合培训课程，想在一段时间内完成认可的培训模块来错开培训，如仪表等级课程、多机组合作课程、航空运输飞行员执照（airline transport pilot’slicence，ATPL）理论知识课程等。

任何想成为航线飞行员而获得商业飞行员执照的人都要求有仪表等级（instrument rating，IR），仪表等级考试（初始测试）涉及在模拟仪表条件下的轻型双发飞机的飞行，包括等待程序与仪表进近。考试过程中，考生戴上头罩，遮住目光，看不到飞行仪表以外的任何东西。要保持飞行执照现行经历，所有航线飞行员要求在现飞的机型上（通常使用模拟机）每年一次重新参加仪表等级检查，作为熟练水平检查的一部分。初始仪表等级可能是飞行员职业中最严格的飞行考试，在这个阶段，飞行员缺乏经验，考试很难。

商业飞行员执照/仪表等级（CPL／IR）组合构成进入航空公司飞行的基本要求，所有飞行员开始航线飞行前都需获得这些执照。注意，任何飞行执照授权持有人仅能飞在执照获得国注册的飞机。如果飞行员要飞另一个国家的飞机，他首先要经过相同的程序获得该国执照，除非存在互惠性安排——英国与美国没有互惠性安排，但美国会根据英国的执照颁发免费的美国私人飞行员执照。但不管CPL／IR组合是怎样获得的，成功实现的道路并不容易。空军培训或航空公司资助的选拔都很严格，竞争很残酷。很多申请人的资质都有优秀，包括大学学位，但仅有极少数最终被接受。除了严格的选拔程序外，对符合条件的申请人要求极其苛刻，而飞行课程的失败率也非常高。飞行培训花费很高，飞行员通过了基本阶段后，航空公司或空军服役的成本急剧增加。比如，据估

计，从零开始直至达到操作标准，在高速喷气机飞行中队培训一名空军飞行员，按最短时间计算，三年的成本是 580万英镑。

空军与航空公司一样，想选拔最好的候选人，但怎样挑选却很难说。显然，某些天生的素质很受欢迎，如协调程度高。设计好的各种能力倾向检验主要作用就是把这样的人找出来。当然，差不多每个人都能学会飞行（就像学开车、骑马一样），但仅有少数人具备职业飞行员的天赋能力（就像赛车手或比赛骑手）。在早期的飞行中，空军飞行员是从骑兵中挑选的，人们假设协调能力高、很会骑马的人，在飞机上也可达到同样的标准。个人素质，如一定程度的自信、自我约束、有一定独立倾向和良好的团队协作能力，最符合职业飞行员的要求——实际上，这些也是其他很多行业所要求的素质。

从众多申请者中脱颖而出的极少数人，还要应对严格的飞行课程。那些个人有能力支付标准课程成本的人可以避免严格的挑选程序，但也不能保证成功。还有一年的艰苦考验与飞行测试在前面等着他们，如果没有通过，不会退还费用。当然，一旦获得CPL / IR，也不能保证航空公司会接受申请人，很多人首先要求在其他地方获得经验。的确，经济衰退打击航空业，缺乏需求甚至导致航空公司拒绝接纳那些在其资助方案下接受培训的人员。

毋庸置疑，未来的航线飞行员最大的障碍是获得CPL / IR和被航空公司接受（假设申请人在生理上、学业上、心理上符合要求）。那些持有基本执照并最终加入航空公司的人，很多只有驾驶轻型飞机的经验，即使接受过空军培训，也仅飞过战斗机，尽管其本身也要求较高的技术操作，但与航线飞行很不同。因此，进入公司的大多数申请人，此时才开始真正的航线飞行训练。那些一开始仅持有基本执照、仅有几百小时飞行经验的人，要求三年的航线飞行来完成培训，积累所要求的经验，以消除掉所有的限制条件。即使在这一阶段，有些人还会半途而废，达不到规定的目标。成功完成后，大多数飞行员能够获得最高级别的执照，航空运输飞行员执照（ATPL，英国），或航空运输等级（airline transport rating，ATR，美国与加拿大），或同等级别的执照。它要求几百小时的飞行经验（取决于各国的要求），并通过进一步的考试。有相关经验的副驾驶也必须具备获得ATPL /ATR的能力，以便航空公司需要时能够马上考取。航空运输的每一位机长都必须持有这个执照。

在某些情况下，副驾驶即便持有航空运输执照，也还是有很长的路要走。只有机长从航空公司退休后，才会从副驾驶队伍按照资历提升出新的机长（还必须通过严格的机长训练）。在有些航空公司，自飞行员进入公司到有机长职位，要等15年之久。大多数人在具备必要经验后等了10年左右，这种等待让有些人很沮丧。

但是，不论是机长还是副驾驶，在其职业生涯中都需要保持其执照现行有效，还要定期参加法规要求的测试——体检（每6个月一次）、飞行熟练水平检查（6个月）、安全设备与程序检查（13个月）、航路检查（13个月）和技术调查问卷（13个月）等。再没有哪个行业有如此

多的全面检查。在这个阶段，飞行员因为没有通过技术或飞行检查危及自己的职业的情况，还很少遇到，但总是会担心因为体检丢掉自己的飞行执照。医生一下笔，飞行职业可能就结束了。然而，虽然这一职业面临种种挑战，如经常的医疗风险、频繁的检查、较早退休（55~60岁）、失调的生活和巨大的责任，但物质的报酬也很高，在很多欧美的航空公司，优秀机长的年收入可达240 000美元。



两名飞行员组成的波音777飞行机组

机组配额

波音777机组通常包括2名飞行员：机长和副驾驶。长途飞行会携带额外的飞行员来换班。副驾驶一般在小飞机上开始其飞行生涯，一步一步地走上大飞机。飞行员通常从副机师（first officer，F/O）就开始其航线飞行，制服的手臂上有两条杠，成功完成多年航线飞行与机长课程会增加几条杠。比如，5~7年航线飞行的高级副机师（senior first officer，S/F/O）有三条杠，在提升到机长之前保持三条杠，机长穿的是四条杠制服。

机长坐在左座，副驾驶在右座。机长在左座的起源已无从查证，从最早的并排座位布局就一直是这样。如今，很多女性也活跃在世界各地的驾驶舱，女性队伍在不断壮大。1979年，第一名女性喷气机机长、丹纳尔航空公司[1]（现已倒闭）的伊冯娜·辛特斯（Yvonne Sintes）在彗星号飞机，与副机师玛丽莲·布思（Marilyn Booth）组成了第一个全女性飞行机组。1984年7月，美国人民捷运航空公司的林恩·里佩尔迈耶

（Lynn Rippelmeyer）成为跨越大西洋的首位波音747女机长。

机组操作

飞行机组坐下后，必须一直系紧安全带，即使托盘放在腿上用餐时也是如此。然而，在巡航阶段，波音777的所有紧急动作可仅由一名机组成员来完成，另一名可以短暂休息。通常，机长与副驾驶共同飞行，轮流操纵飞机。一人在自己这一部分操纵飞机，另一人完成不操纵飞机的飞行员的任务，如监控设备运行、记录飞行日志、保持无线电工作等，下一航段轮换。职业飞行员的能力相差不大，当然有些要优秀一点。航线飞行员优秀的操纵能力并不像人们想象的那样重要——大多数飞行都是自动的，如今，飞行员的工作基本上是一名运行管控和系统管理者。飞行员常常谈论同事是一名好的管控员，而不是说对方是一名好的飞行员——能非常准确地操纵飞机沿山边飞过的人可能是一名优秀的操纵飞机的飞行员，但可能是一名很差的管控员。

然而，飞行员有时不得不仅仅靠眼力与直觉使大型喷气飞机在多山地区的机场着陆，甚至是在天气不好的夜晚。有时，地面设备没有安装，或它不工作，或在维修，或者因为风向改变，向跑道进近要求飞越复杂地形，而那里又禁止安装仪表着陆系统。在这些情况下，飞行员要利用所有的基本飞行技术，或许开始最后进近前要飞一个起落航线，飞重型喷气飞机要用到飞轻型飞机的那些操纵技能。强侧风时难以自动着陆，或者遇见大气颠簸，飞机需要人工来飞。目视进近与着陆这样的程序仅需几分钟时间，侧风接地时的拉平判断只需几秒钟时间来执行，这需要大量的训练与实践。像其他职业一样，飞行机组往往要完成非常艰难的任务，而看起来很容易。为保持操作技能，避免生疏，机组成员要求定期操纵飞机飞行（类似于演奏乐器一样需要实践），实际上按照法律规定，飞行员必须每28天飞行一次，或在飞行前要在航空基地接受重新检查[2]。

一次飞行前，机组成员之间可能从未谋面。驾驶舱里的标准化是最高等级的。即使是接受过培训的观察员也难以判断某一个机组以前是否一起飞过。（这样的系统就避免了机组养成不好的习惯，避免了某一名成员因故换人而打乱机组常规。）每一名机组成员有自己单独的职责要完成，这是完整操作不可分割的一部分，机组成员间必须配合。飞行机组以团队来操作，机长领头，在驾驶舱的封闭环境里，每一个人完成自己任务的同时，都认真监督对方的操作。（大多数的驾驶舱很小，机组成员坐下后，需要够得到所有的设备，因此座位靠得很近。）检查单、程序与动作练习都符合人体工学设计，操作时高效而不乱，机组的操作可望达到最高职业标准。当然，机组成员也犯错误，也有错、忘、漏，但在驾驶舱密切监视的环境里，每一个人都习惯于纠正对方和被对方纠正，系统运行得极其良好。

大多数的飞行中，操作都是例行程序，与严格环境（如手术室或电

视演播室）中的其他职业团队一样，机组采用标准化与机械的程序。认为机长每时每刻都要作出重大决策，这种想法未免天真。但飞行情形不断变化，哪怕是重复飞相同线路，与其他实际情况一样，也需要克服很多小的困难。比如在高速公路上，每个司机都知道会出现道路施工、交通拥堵、抛锚、改道、天气等问题。飞行中，机场施工、起飞与着陆延误、故障、更改航路、天气等，也会导致类似问题。像其他职业一样，机组不仅要认真完成这些例行程序，完成这个过程本身也要求技术精湛，而接受的培训也可用来应对任何紧急情况。极少数情况下，真的出现紧急情况，如恶劣的天气、系统故障、发动机失效、飞机起火等，就需要作出决策，有时就是一刹那的事，可能影响飞机的安全，甚至数百个人的生命。此时，机长的才能得到了彰显，同时机组所经历的培训这时也要接受检验。

机组涉猎的知识面很广，但都不深入，正如英航机长伊恩·弗劳（Ian Frow）所说："好像什么都懂，其实只懂一样！"离场前首先需要彻底检查飞行的详情（天气预报、燃油、飞行计划、装载等）。很多文件是由地面人员完成的，对飞机的实际操作并不总是像手册、图表与统计数字所指明的那样，机组的专业知识会影响在最后一刻要求作出的改变，最终决策由机长作出。机组是最后一道防线，防止把任何失误带入空中。在最后的分析中，是机组单独承担责任，最终责任牢牢地落在机长身上。很清楚，责任到此为止！

飞行员在驾驶舱是怎样飞的？这难以言表或形象比拟。显而易见，起飞与爬升、下降与着陆，是最忙的阶段，即使这时很少看到机组的身体活动，飞机的飞行大多都是由自动驾驶仪来完成。这种状况下的飞行员往往很像全神贯注的象棋运动员，经常是身体不动大脑在动。就像国际象棋，大飞机的操作也包括很多简单的基本招式，一起构成一个复杂的整体。机组也许不能称为"大师"，但大飞机基本的飞行招式多达数千种，被"将死"是决不允许的。加之要为好几百人的生命负责，以及飞机高昂的费用（一架波音777要花费近1.5亿美元），那可不是玩一个简单的游戏。

尽管有先进的设备，机组接受的训练却是怀疑这些自动化设备。设备越可靠，出现故障时机组成员越容易毫无防备。飞行员要想在飞机的前面，这就要求集中注意力，保持警觉，尤其是起飞与着陆时。尽管自动驾驶仪可以操纵飞机，但在整个飞行过程中，每位飞行员要不断地更新大脑内飞机位置与操作要求的图像。不论是夜间，还是飞机在云里，或者没有可利用的电子信号时，都要求通过观察各种显示、听其他飞机的无线电报告或调无线电信标台等，来监控与交叉检查这些自动化设备，从而在大脑中建立整个情景的图像。这有点像从地球看太阳系。实际上，为了更清晰地展示，太阳系模型往往都是想象从外面来观察它。以同样的方式来观察机场周围的飞机活动，图像就清楚多了。然而，坐在驾驶舱里仅靠一个人的基本机能，建立这样一个动态图像是很不容易的。难怪早期的天文学家认为太阳绕着地球在转。

飞行员也需要专注于自动驾驶仪，它既不能思考，也不会听空中交

通管制的指令，飞行员需要不断地给自动化设备输入所要求的信息。如果输入信息有误，自动驾驶仪会毫无异议地服从，因此最重要的是保持警觉。所有的飞行机组需要在每一次的飞行中不断磨炼基本驾驶术（即整合的训练实践、技能、经验与职业判断）。

机组条件

飞行机组条件随航空公司、机型、航路网络的不同而不同。有些机组一直在固定的线路上飞，有些则随他们的机型飞往世界各地。有些航空公司直接按照执勤表上的顺序来给机组排班；有些航空公司使用竞标系统，机组成员就像拍卖时那样去竞争某个工作，资格越老，越有机会获得成功的竞标。很多短途航空公司采取飞6天休3天的常用办法，机组除了少数晚上在外，大多数晚上在家。长途飞行时，机组外出一次可能长达两个星期，一年中可能有180天甚至更长的时间不在家，甚至更多。

机组不在航空基地时住在高级酒店，吃饭的补贴分开支付。短途飞行的机组可能偶尔在国外另一个城市24小时停留，而长途飞行的机组通常沿航路休息。由于大多数航班都是按天来计算，机组每天都在不停地换地方。举个例子，基地在纽约的一个机组，执行环球飞行航班，沿纽约、旧金山、东京、香港、德里、伦敦、纽约飞行，按天计算，从理论上看，10天环球一次，每天执勤达到10小时，经停站待一天。这样飞行8小时，休息24小时，另一个机组把飞机飞往下一个目的地。（中转期间，时差可能很大，大多数机组成员会试图按照当地时间起居。）24小时后，休息的机组接到达的航班继续向前飞，重复这个过程。

理想情况下，机组最好的休息时间是12　或36小时，分别经历1次或2次睡眠模式再开始执勤。但商业飞行的要求往往是24小时的休息时间。正常的24小时日节律包括8小时睡眠，接着16小时是醒着的，机组在24小时休息时间里只有一次睡眠时段，往往回来执勤时第二次睡眠时段马上就要开始了。

北大西洋航程向西飞行白天长，向东飞行夜间长。因此，欧洲的机组白天飞往北美，在目的地过一夜与第二天的一部分时间，夜晚返回。美国机组夜间向东飞行，在欧洲过一天一夜，次日白天返回。这就意味着飞机差不多要连续不断地需要新的机组。另一方面，航空公司每周一班飞往遥远的异国岛屿，如印度洋的毛里求斯，要有一个机组在那里无忧无虑地等一周，下一次航班来才换班（差不多是一个免费的假期）。有些航空公司干脆让飞行员带着家人以国外某个城市为基地，一次待上几个月。

飞行机组的重要限制是实际飞行小时数，法律一般规定每28天不超过100小时。根据法律，机组必须把所有飞行小时数记录在个人航行日志上，记录“撤轮挡”到“上轮挡”的格林尼治标准时间。批评者认为，机

组享有高薪却做的是非全职工作，每28天最高100小时听起来不多，实际上机组需要上班很长时间才能累积几小时的实际飞行小时数。比如，半个小时的短途飞行，机组一天完成三个往返总共才3小时的飞行时数，把在任何一地的飞行准备与地面等待时间加起来，可能要上8～10小时的班。长途飞行，比如科伦坡–塞舌尔–约翰内斯堡航线，总共飞行时间约9小时，但整个上班时间近12小时，甚至要在午夜就开始。事实上，一直在白天与晚上中转的很多长途飞行，很多工作是在晚上。（比如，从欧洲到澳大利亚的长途飞行，要把起飞与到达安排在旅客合理的时间，但航路上的中转往往在午夜。）极少数情况下，延误可能使机组的上班时间长达16小时（经常高达13小时），相当于在办公室从上午9点工作到次日凌晨1点，还要艰难开车回家。



把轮挡固定在前轮是为了防止飞机滚动，飞行员的飞行时间是用从撤轮挡到挡轮挡的时间来记录的

为预防疲劳，法律限制了机组的日程安排范围，机组飞行的最长执勤日取决于离场时间、飞行的航段数，以及是从家所在的基地还是远离基地的地方开始飞行。尽管有规定，疲劳预防依然是个问题，机组成员在不同情况下作出不同的反应。像所有旅客一样，飞行机组除了操纵飞

机，还需要应对平常的旅行疲劳影响。为便于行政管理，机组名单列入一个总申报表，通常单独办理移民与海关手续，这确实减轻了负担。（几乎所有国家对机组的海关规章要比对乘客严格得多。）疲劳往往由多种因素引起，由于客舱高度导致的低含水量、低氧气吸入，会加重长途飞行的疲劳。较大的时差变化、极端的温度与天气、接触性质不同的食物与水（离开加尔各答，幸福的事就是放个干脆利落的屁）、不断变化的生物节律（任何复杂的任务都会突显出执行能力最细小的变化），有时简单到在夜间离场而白天无法在宾馆睡着（每一个宾馆好像都雇有维修人员，敲个不停），所有这些都会对机组成员造成负面影响。至于饮酒与飞行的关系，机组在开始执勤前8～24小时内不允许喝酒，具体时间每个国家的规定不同。

[1] 丹纳尔航空公司成立于1953年，总部在英国伦敦盖特威克机场，1992年并入英国航空公司。——译者注

[2] 运行规则要求，飞行员取得飞行执照后，必须满足90天以内在被批准的机型上有三次起飞着陆，否则必须重新带飞检查之后，执照才有效。有些航空公司自己制定的标准高于规则的要求。——译者注

FLYING THE BIG JETS

第二部分

波音 777-200 飞行实例

[本部分由斯坦利·斯图尔特和约翰·爱德华兹共同完成。]

11

英航 213：从伦敦到波士顿

相信通过前面的章节，读者们对飞机的方方面面应该已有大概了解。这一部分会涉及很多航空术语。尽管大多飞行是例行工作，但没有两次是完全相同的，这是一次典型的英国航空公司波音777–200的飞行写照。

飞行计划

在运行中，有关飞行的文件在计算机中汇总。运行人员已经准备好有关这次飞行的信息细节，迎接机组人员接收前的检查和询问。现在距起飞时间不到一个小时了，这是一段繁忙期。就在起飞前一小时的时候，机组人员到岗开始工作，查看最新的公司通知、邮件等。如果机组人员相互不认识，会利用这段时间介绍自己。执勤时间从到岗签字时开始计。

机长和副驾驶组成的机组，执飞英国航空公司每天一班的伦敦至波士顿的航班，飞机呼号为英航213。起飞时间为格林尼治时间10时50分（此时间同英国冬季地方时），预计到达时间为格林尼治时间18时20分，以目的地地方时记的到达时间为13时20分（即在冬季，波士顿时间比格林尼治时间晚5个小时），计划飞行时间为7小时30分钟。航段时间包括滑行、起飞和进场延误等，以及今天实际的飞行时间（从升空至接地是6小时40分钟）。

与许多现代大型喷气式飞机的长途飞行能力相比，英航213今天的飞行时间相对较短。现代大型喷气式飞机可飞极长的航程，例如从伦敦至香港、从德黑兰至纽约或从悉尼至洛杉矶，这些都是常见的。最长的交运飞机飞行是由一架澳洲航空公司的波音747–400执飞从伦敦至悉尼（航程9 720海里）的航班，总飞行时间为20小时9分钟。飞机在着陆时仍带有4吨燃油；尽管该飞机飞行是空载，但这仍是一次不可思议的成功飞行。此次飞行携带的初始燃油量为183.5吨，使用的是专用高密度燃油，飞机是被牵引到跑道头起飞的。该747–400飞机最初的巡航高度为飞行高度层33 000英尺，在西澳大利亚上空时达到飞机高度极限45 000英尺。

尽管较大的飞机有更大的燃油容量和精密的电子设备，然而，这些条件在正常操纵情况下未必会使机组工作简化。在考虑飞行成本和飞行安全的前提下，机长会携带最少的燃油。有时，出于经济性方面的考虑，公司会要求飞机飞至设计极限，结果便是一架大型客机载有少量机组人员和大量货物飞过一段极长的距离，最终在变得非常差的能见度中着陆。

正值9月中旬，美国逐渐进入初冬，机长正仔细地查看波士顿的天气。天气报（见图11—1）预报了从起飞当天格林尼治时间12时到次日格林尼治时间12时共24小时时段的天气情况。

BOSTON (BOS) CODED TERMINAL AREA WEATHER FORECAST

TAF
KBOS 1212 06011 2400 61RA OVC 003 INTER 1220 4800 61RA OVC 007 GRADU 1920 25014 9999 WX NIL OVC 020 PROB40 2023 3200 83RASN OVC 010 GRADU 2223 29017/28 BKN 035 GRADU 0507 CAVOK GRADU 1011 27015 =

图11—1 波士顿天气预报

> 风向60 度，风速11 节，能见度2 400 米，有雨，阴天云高300英尺；在格林尼治时间12 时至20 时期间，天气间歇地表现为能见度4 800 米，有雨，阴天云高700 英尺；在格林尼治时间19 时至20 时期间，天气逐渐变为风向250 度，风速14 节，能见度大于10 千米，无重要的天气现象，阴天云高2 000 英尺；在格林尼治时间20 时至23时期间，有40% 的可能天气会变为能见度3 200 米，有雨夹雪，阴天 云高1 000 英尺；在格林尼治时间22 时至23 时期间，天气逐渐变为风向290 度，风速17 节，阵风28 节，多云云高3 500 英尺；在格林尼治时间次日5 时至7 时期间，天气逐渐变为晴空万里（ceiling and visibility OK，CAVOK，即能见度大于10 千米，无重要的天气现象，无重要的云）；在格林尼治时间次日10 时至11 时期间，天气逐渐变为风向270 度，风速15 节。

上述预报显示天气在预计到达时逐渐好转，但情况仍不是很好。云层延伸覆盖了大部分的东海岸，所有的主要城市都受到了影响。纽约（通常作为备降机场）预报阴天云高500英尺，下雪，能见度为1海里，此天气情况低于备降机场的最低运行限制，即云幕高度700英尺，能见度2英里。

在美国的冬季，雪是很常见的，猛烈的暴风雪会使东海岸的所有主要机场关闭几个小时。如果天气不能像预报的那样快速好转，那么在到达时波士顿的天气可能较差，这会导致延误，由于此次飞行按照要求只携带足够燃油，因此必须保证机载燃油是充足的。

再看看几个加拿大机场的预报，蒙特利尔预报阵风风向270度，阵风风速15~20节，能见度大于10千米，阴天云高3 000英尺。机长将蒙特利尔设定为备降机场，并决定带满应急燃油以防在波士顿会有着陆延误。纽芬兰的甘德和圣约翰机场预报低云、大雨、强风天气，但是在更南边，哈利法克斯国际机场是开放的，很可能在改航航路上，因此成为双发延程飞行（extended range twin operations，ETOPS）的航路备降机场之一。伦敦和香农的天气也都已检查且显示预计未来有云雨，但能见度良好。如果在飞行初始阶段出现问题，这两个机场都是合适的返回备降机场，香农机场被用作在大西洋东岸的双发延程飞行备降机场。在高空航图上也要检查高空风，航路上可收到预报的晴空乱流和可能出现的任何特殊天气。

所有横穿大西洋的双发飞机，像波音777，必须遵从有关双发延程飞行的天气要求与适用性要求。通常，双发飞机必须能在60分钟内以单发飞行速度飞到一个适当的机场。只有那些具有额外的系统余度和经批准的航空公司运行的飞机，在一段适当时间范围内数百次运行中没有出现问题时，可能被准许进行延程飞行。经过一段更长的无故障期之后，该飞机被批准从一个适当的机场起飞，最长允许时间为180分钟。其中也存在一个特例，北太平洋航线上的延程时间可达207分钟（180分钟＋15%）。然而在其他地区，允许执行双发延程飞行的飞机必须能以单发飞行速度（1 200海里）且在3小时以内飞至适当机场。对于横跨大西洋的飞行，3小时足够确定大西洋某一边海岸上的一个机场作为双发延程飞行的备降机场；在此情况下，哈利法克斯国际机场被用作西海岸备降机场，香农机场被用作东海岸备降机场。加拿大的甘德和圣约翰机场以及苏格兰的普雷斯特维克机场也常作为备降机场。

凯夫拉维克[1]的天气也要时常关注。在飞行准备阶段，双发延程飞行备降机场的预报天气情况必须优于正常目的地机场的最低标准，即云底高度必须高于400英尺且能见度达到1 500米 ，大于标准最小值。如果备降机场至少有两条装有仪表进近辅助设备的跑道，那么这些较严格的最低要求可能会下降至云底高度200英尺及能见度800米，仍高于正常情况下的最低标准。在准备阶段，机组要了解并考虑到飞机上的任何小故障。在很少的情况下，一个故障会使双发延程飞行时间降至120分钟，迫使机组使用额外的备降机场，如亚速尔群岛的拉日什机场和/或凯夫拉维克机场，但是通常不会允许出现这样的故障。

执行双发延程飞行的飞机可能也需要携带额外燃油以应对可能出现的一发失效和/或在大西洋中部上空座舱释压，迫使飞机下降至15 000英尺（一些双发飞机为10 000英尺）飞行以及在积冰条件下改航至双发延程飞行备降机场之一的情况。如果正常航程的燃油量无法满足这种需求，则需装载附加燃油。检查航行通告，显示没有可能阻碍起飞的事项（跑道或机场关闭、空域限制等）。航行通告告知伦敦机场有惯例的施工在进行，波士顿机场个别小型灯光和一个无线电频率无法使用，纽约机场的31R/13L跑道关闭，蒙特利尔机场无特殊情况。在美国正进行着一次军事演习，关闭了一些航路，但都不影响本次飞行。最后再检查一

遍总油量，通过心算（6~6.5吨/小时）得出并检查飞行计划表有无错误。

本次飞行共需要燃油52吨，其中42.6吨燃油用于伦敦希思罗机场至波士顿机场的航程，7.2吨改航燃油（包括储备燃油）用于备降蒙特利尔机场（以防万一），1.4吨的应急燃油和760千克用于在伦敦机场滑行的燃油（见图11—2）。

飞行计划上有整个航程中各段航路的情况（见图11—3）。要与发送给空中交通管制的飞行计划航路（见图11—2）核对检查，而飞行计划则在起飞前已由运行人员向空中交通管制部门申报。这次申请的航线为UG1飞至Dikas，高度为31 000英尺；UG1飞至Strumble，高度为35 000英尺；Upper Bravo Ten飞至Cork[2] ；UN523飞至52N 30W[3]；之后以39 000英尺高度飞“Charlie”航线，坐标依次是52N 15W、51N 20W、 51N 30W、51N 40W、49N 50W，到达加拿大纽芬兰海岸上的Vixun；最后飞北美航线112B至位于波士顿东北部的Scupp。

北大西洋的航迹系统包含了约6条几乎平行的航迹，航迹从英国和爱尔兰海岸进入点开始进入，飞行至加拿大海岸退出点结束，反之亦然。（通常情况向西飞是白天，向东飞是夜间。）这些航迹每天要由计算机选择两次以避免从欧洲飞往美国时遇到强烈顶风（特指航迹A、B、C、D、E和F），而且当反方向飞行时可以随最佳风向飞行（特指航迹U、V、W、X、Y和Z）。所要求的航迹是依据飞行的起飞地和目的地制定的，对于英航213，航迹“C”的飞行时间最短。最终飞哪一条航线是由该航线上飞机拥挤的程度决定。

北大西洋航线航图上的各个数据与飞行计划上的坐标要进行仔细精确的交叉检查。有如此多的飞机同时沿同一个方向交叉穿梭于近乎平行的航线上，坐标上的一个小错误都可能引发冲突。 航空公司都趋向于在大多相同的时间离场，在几乎相同的时间到达相近的目的地。由于所有大型喷气式飞机更倾向于飞行在高度从28 000英尺至39 000英尺、宽度11 000英尺的狭窄飞行高度层中，因此常常产生空域拥挤，特别是飞越北大西洋这样忙碌的地带的上空。双发飞机的推重比四发飞机更高，这使它们能应对起飞时单发失效的情况，这样就可以在起飞后就达到比四发飞机更高的初始巡航高度。因此，双发飞机比与之竞争的四发飞机更有可能在飞行初始阶段就爬升至最佳飞行高度层。

飞机通信寻址与报告系统的使用使文件工作大幅减少。飞行的详细情况，例如燃油需求量、航路规划、航路风等都被管控人员存于电脑中，一经机组人员要求就可以通过飞机通信寻址与报告系统上传至飞机，从而自动加载到飞行管理计算机。

在书面文件核对完成后，机组乘机组车前往本次执飞的飞机，注册号为G–VIIL，飞机停放在机场南边的英国航空公司4号航站楼T8（Tango 8） 停机位。（飞机注册号的首字母代表国家，如D –德国、F –法国、G –英国、N –美国等，后4位类似于机动车车牌号。注册

号后2位通常用于区别一架飞机，在本例中为“India Lima”即I和L。）T8是一个停机位，飞机机头朝内停放，乘客经过从候机楼伸出的像手指一样的廊桥由前客舱门登机。现在距起飞大约50分钟，许多检查项目和程序仍需完成。

```
Page 7 of  7  BA213/

ETP  ORIG/DEST   WAYPOINT PLUS    TIME ON  FOB  CRIT FUEL
 1   EINN/CYHZ 51N030W      P0.48  2.41   27121   23871
 TIME WINDOWS  CYHZ   1549 TO 1749
               EINN   1027 TO 1949

FF
0816 EGLLBAWD
COMPANY ADDRESSEES
(FPL-BAW213-IS
-B772/H-SXRWY/C
-EGLL1050
--N0443F310 DCT CPT UG1 DIKAS/N0475F350 UG1 STU UB10 CRK
UN523 52N015W/M084F390 NATC VIXUN/N0475F390 N112B
-KBOS0635 CYUL
-EET/EISN0032 EGGX0114 CZQX0230 VIXUN0439 CZQM0508 KZBW0603
REG/GVIIL SEL GKHR RALT EINN CYHZ RMK/AGCS EQUIPPED  TCAS
EQUIPPED)


P 1 OF 7 BA213 /   LHR-BOS ETD  1050/         777/2 G-VIIL
     ETOPS ETPS CRITICAL FUEL/TIME VALIDATED 180 MINS
C/S BAW213   0.0   EGLL-KBOS M 5.0  T/O SLOT ....

178.6 --ZFW-- .... 1820 ATA .... TNKS ....     3 MNTH ROUTE STATS
                                               PCNT     TONS
229.9   TOW   .... 1050 ATD .... USED ....     50        0.0
                                               15        0.9
187.2   LAW   .... 0730 TOT .... LEFT ....
                                               AVG     P0.13
 32.3   PL    .... HOLD W A .... ACH FL ....

TRIM  .....  MIN COST - VAR SPD - FP  NO. 1  0816

ROUTE 02C  -  FL310  NAT TRK C
DIKAS/FL310  5215N/FL390
TIF    ......  42624  6.40  2886NM W/C M31          TOC OAT M46
CONT   ......   1387    15  ERA  YHZ  /CYHZ         WIND  35017
DIVC   ......   4533    41  YUL /CYUL FL280 P25 245NM
RES    ......   2683    30  PLAN REM 8.6 TOT RES 7.3
REQ    ......  51227  8.06                      COST INDEX    0
EXTRA  ......      0        WX ATC ......
TAXI   ......    760   (24)
TANKS  ......  51987 KG                             ELEV  BOS  20
FIVE ONE NINE EIGHT SEVEN  KG

OHDIV           2217    36  YUL /CYUL FROM FL370 P24 245NM
DIV2            3997    35  BGR /KBGR FL170 P31 199NM

WEIGHT CHANGE P 5000 KG  FP  877 KG  TM  1  TRIP FUEL
HEIGHT CHANGE M *** NOT CALCULATED
SPEED  CHANGE NOT CALCULATED
SPEED CHANGE CI 100       FP 278 KG  TM 3 TRIP FUEL
FL350 5215N/FL390

RMKS NAT -B- PLUS 1MIN/500KGS
     ETOP 180 MIN RULE PLAN
    ETOPS ERA EINN  CYHZ
```

图11—2 空中交通管制和燃油飞行计划

```
PAGE 2 OF 7 BA213/
 WAYPOINT COUNT    9 CWC    9 (NOT TOC/TOD)            TOT RES    7.3
 POSITION    ID/FREQ                  ETA/RTA ATA TTLT GDTG REM  REQ
   MSA    AWY   /ITT/    -TRM-   DIS    TIM          FL  COMP MACH G/S

 LONDON HEATHROW                      .../... ... 0.00 2886       42.6
   3.0   SID    /246/    -VAR-     7     2          ...  M012       200
    T4 ACARS LS SPDBD 131.9 131.55 131.8  DEP ATIS 121.85

 RW27L-273/ILL-D1                     .../... ... 0.02 2879
   3.0   SID    /270/    -275-     4     1          ...  M009       259

 LON-259/RW27L-273                    .../... ... 0.03 2875
   3.0   SID    /252/    -257-     1     1          ...  M009       270

 LON-260/D07.0                        .../... ... 0.04 2870
   3.0   SID    /266/    -271-     4     0          ...  M008       294

 WOD-093/LON D11.0                    .../... ... 0.04 2870
   3.0   SID    /270/    -275-     5     1          ...  M008       339

 WOODLEY      WOD 352.0               .../... ... 0.05 2865
   3.0   SID    /281/    -286-     5     1          ...  M007       344

 CPT-104/D08.0                        .../... ... 0.06 2860
   3.0   SID    /281/    -286-     8     2          ...  M008       367

 -COMPTON     CPT114.35               .../... ... 0.08 2852
   3.0   UG1    /283/    -288-    19     2          ...  M009       367

 -BASET                               .../... ... 0.10 2883
   4.3   UG1    /283/    -289-    56     8          ...  M009       456
 PAGE 3 OF 7 BA213/
 WAYPOINT COUNT    7 CWC   16 (NOT TOC/TOD)            TOT RES    7.3
 POSITION    ID/FREQ                  ETA/RTA ATA TTLT GDTG REM  REQ
   MSA    AWY   /ITT/    -TRM-   DIS    TIM          FL  COMP MACH G/S

 -TOC                                 .../... ... 0.18 2777      38.3
   4.3   UG1    /283/    -289-     3     0          ...  M007 .758/436

 -DIKAS                               .../... ... 0.18 2774      38.3
   4.3   UG1    /282/    -287-    67     9          ...  M006 .818/469

 STRUMBLE     STU113.10               .../... ... 0.27 2707      37.1
   3.0   UB10   /267/    -274-    44     5          350  P013 .816/486
```

图11—3 飞行计划进程

飞行前

登上飞机后，机长便与签派员联系乘客登机情况和装货细节，然后机长和副驾驶开始做飞行准备。今天机长执飞至波士顿的航段，由副驾驶完成其正常工作，而在回程时机长和副驾驶的工作将互换。

每一个机组成员，驾驶飞机和不驾驶飞机的飞行员都一样要根据他们在每一航段的职责精确完成其任务。机长首先要查看包含重要飞机文件的许可文档。包含飞机的基本重量和指数的卡片在驾驶舱的后部、机长头部的后方，用于交叉检查起飞前签署的现行装载单。

然后，机长要检查维护记录来查看飞机情况，并记下可能影响飞行性能的任何相关故障，即便是那些在签派准备时提及的也要记录。一个列有可接受故障（可以延缓维修、不影响飞机起飞的故障）的清单包含在最低设备清单中。小故障也许会作为“状态信息”出现在多功能显示屏上，该显示屏常被飞行员称作下部发动机指示与机组警告系统，这种信息用于进入最低设备列表，尽管对于双发延程飞行通常不允许有故障。

机库里的维修

众所周知，飞机维护是一项长期持续的工作，如果时间允许，在每个基地航站及中转站都要进行例行检查，清除任何小毛病。引起这些小毛病的原因经常只不过是灰尘、潮湿，或是有稍稍的接头松动，拆卸和重装一下设备常常就足以清除这些问题。任一未解决的故障都要填入维修记录并返送回基地。有些设备准许在故障情况下继续飞行，这种情况可能会给机组带来一些例外的工作，但并不会被认为是不安全的。较严重的设备故障（主显示屏失效、飞行控制或发动机故障，或是起落架或襟翼故障等）必须在飞行前修复，这就会经常导致延误。尽管乘客和机组人员都不愿意，但安全毕竟是高于一切的。



维护机库

在飞行基地，机库里的维修是依据制造商维修大纲实施的，检查的频率和程度以及设备的更换取决于飞行累积小时数和着陆次数等。飞机定期检修，飞一段时间停一阵，已经是航空界普遍的做法。状态监控目前也是例行程序，其中检查程序和内置监控系统定期并持续更新设备的现状。在波音777飞机上，可利用飞机综合管理系统存储的技术故障数据，系统信息由地面工程师通过一台安装在驾驶舱后部的“个人型”电脑更新。飞行员也可以用两边第一个侧窗之下的屏幕查看所有故障。在飞行中，飞行员记录任何显示在该屏幕上的当前航段的故障，相关状态信息也显示在下部多功能显示屏，显示屏上还给出了记入维修记录的故障代码。地面工程师可以在飞行中的任意时间通过系统来询问飞机，得知大量的发动机与系统的现行参数。如果发生严重故障，飞机本身会自动地隔离故障，启用备用。飞行员的侧方维修方式显示屏可以显示大量信息，这些信息常被飞行员用于在巡航阶段检查在起飞期间的抬头速率（俯仰变化率），或者在抵达停机位后，这些信息可用于检查着陆的轻重情况。

金属的疲劳和腐蚀分析项目也在机库维修期间进行。现在，制造出的飞机至少有25年的使用寿命，并且完全足够应对每天飞行操作的压力。极端天气条件、大幅温度变化（地面35℃到巡航中–60℃的温度变化并不罕见）、机翼弯曲、着陆和起飞载荷或发动机振动几乎都不会造成问题。然而，每一架飞机可能会经历紧急情况，例如重着陆、恶劣天气或严重乱流以及危险品泄漏导致洗手间或厨房可能造成腐蚀。因此，反应金属疲劳的腐蚀和裂缝探测是每次检修的重要组成部分。在机库里，飞机各部分可用X光检查，对重要区域的深入分析可以利用超声波裂缝探测技术来实现。局部裂缝（扣件附近等）可以通过测量涡电流波扭曲程度的仪器探测出来。除了这些现代设备，目视检查仍起着至关重

要的作用，任何仪器都无法替代旧式的穿着白衣服、拿着手电筒和放大镜检查的检查员。

机组登机

在飞行中操纵飞机的驾驶员——机长，负责执行飞机的外部检查，在确认了技术记录的总体情况良好之后，开始“绕行一周”。检查从前轮开始，接着至右前方机身，沿着右翼，检查右发动机和右起落架部分，然后在机尾区域检查尾翼和安定面，沿着左翼检查左发动机和左起落架部分，再沿着左前部机身回到前轮。机长检查轮胎状况，寻找磨损标志（轮胎不会定期更换，只在需要时才会换，例如当有明显超过一定大小或深度的磨损或切口时），检查液压和滑油泄漏，检查蒙皮和机体表面损坏，检查操纵舵面，检查空速管和全静压孔是否被遮盖，确认接口面板安全。在绕机检查期间，机长将加油数据交给加油人员，并可咨询地面工程师技术方面的任何问题。

在机长完成机外工作的同时，副驾驶在驾驶舱内检查应急设备，如果电力和供飞机的气源还未建立，副驾驶还要完成安全检查，确认某些部件，如液压泵开关处于关闭位、起落架手柄处于放下位、备用襟翼电门处于关闭位。然后，如果辅助动力装置还未运行，副驾驶便启动辅助动力装置，建立电源系统。之后进行驾驶舱及其周围的安全检查以排查任何可疑项目，例如爆炸性装置，这些物品可能被偷运上飞机。每架飞机携带的大量的书、手册和文件被称为图书馆，工作人员也要依据操作区要求清单对其进行检查，像灭火器、防火手套和救生衣等应急设备也要经过检查，确保它们存放正确。

现在开始进行驾驶舱飞行前准备系统和设备的检查，即所谓的扫描检查。采用的程序是按照记忆逐一检查每一个项目，检查从左上部的维护顶板开始，向下至顶部跳开关面板，再向下至顶部系统面板，再到遮光板上的自动驾驶电门，之后检查发动机指示与机组警告系统来确认正常指示情况。作为辅助发动机指示，检查多功能显示器，或下部发动机指示与机组警告系统，检查状态页面中正常的液压量和氧气量。然后重置电子检查单和数据链系统。之后继续检查中央控制台、减速板、油门杆、襟翼手柄、无线电设备、应答机，确认天气雷达已设定，方向舵配平处于中立位。检查的最后一项是检查后头顶和后面板。

检查项目太多，无法一一提及，但包括对跳开关的检查，在飞行管理计算机的相应页面输入飞机当前位置（严格来说，飞行管理计算机应该称为控制显示组件，但大多数飞行员把它叫作飞行管理计算机），检查电气、液压和燃油面板等，然后将风挡加热电门选择在打开位（驾驶舱风挡厚度有5~6厘米，可以通过加热来除雾和防止在低温下积冰，导致风挡变脆。风挡抵抗鸟击的强度是在工厂里用一个特殊的大炮向风挡薄层部分发射死鸡来测试的）。飞行员也要检查设置好停留刹车，关闭推力手柄。

此时，副驾驶要开始检查右座的右侧部分，从侧板开始，检查氧气面罩，确认侧窗已锁好，完成电子飞行仪表系统上的选项，检查在面板边缘的仪表源选择。随后继续检查主飞行显示器，确认显示了正确的飞行模式且没有显示任何故障旗，然后检查导航显示器，检查显示状态并最后检查飞机管理系统的主控制/显示组件（master control/display unit，MCDU）。当这些程序都完成后，内部检查就完成了。自动终端情报服务频率为121.85MHz，副驾驶抄收当前机场的天气情况，通播编码“Sierra”正在播发：风向250度，风速15节，温度12℃，露点温度8℃，高度表拨正值1 023百帕，起飞跑道为27号左跑道。副驾驶记录下所有的内容。

现在要做“要求性能数据”的工作，输入填满多功能显示器/下方发动机指示与机组警告系统（MFD/lower EICAS）上的空方格。这些数据包括4字机场代码、使用跑道、风、温度和气压、天气是潮湿还是干燥，以及如果气温和能见度条件要求发动机防冰，预计的起飞全重和任何影响性能的因素，如跑道上有积水、湿雪或雪，等等。这些信息之后会被飞机通信寻址与报告系统传送至签派的计算机，电脑会在约30秒内将“性能数据信息上传”。该信息包括跑道数据、起飞最低天气标准、襟翼设置、起飞性能限制（最大起飞重量）、假设温度（用于发动机减推力）和与预计起飞重量对应的起飞速度，再加上预计重量略有轻重变化时对应的速度。可能情况下，还会显示起飞后单发紧急返航性能。然后，所有数据会由一个在中央操纵台后部的标准尺寸打印机打印出来（见图11—4）。

计算的最大起飞重量能够确保飞机单发时在第一飞行阶段具有足够的超障性能，第一阶段指单发初始爬升，收起落架，收上襟翼和航路爬升。（在起飞后一发故障的情况下另一状态良好的发动机能够保持最大起飞功率长达10分钟。）起飞时单发，通常在高于起飞机场1 000英尺时收襟翼。此时，可以选用飞行管理计算机来显示单发性能数据。这种情况下的预计起飞重量小于最大起飞重量，为延长发动机寿命，使用略微低于最大起飞功率的设置也是足够的。在今天的飞行中可以实施减推力起飞，性能上传信息显示假定温度49℃应考虑使用。计算机计算出在温度为49℃时起飞的全推力，这与当前12℃温度下计划起飞重量所需的减推力大小一致。[4]

PERFORMANCE DATA UPLINK MESSAGE

1 OF 1

BA213	24 JAN 01	G-VIIL 85B
EGLL/27L	FULL LENGTH	TORA 3658
W/C 13 HW	TEMP 12C	QNH 1023
DRY RWY	ANTI-ICE OFF	MACTOW 0

DAY :	CLG NIL	VIS 150M
NIGHT :	CLG NIL	VIS 150M

PVD 75M

PERF CORRS:

NONE

FLAP 05 TOPL: 284.7

ATOW	TEMP	V1	VR	V2
239.7	47	152	152	156
233.9	49	150	150	154
228.4	51	149	149	152

NOTES

NONE

END OF MESSAGE

图11—4 性能数据

计算的起飞速度V1、V2和VR（V代表速度），其意义如下：V1是起飞决断速度。在速度达到V1之前若发生紧急情况，则跑道长度足以保证飞机停下，但若速度已超过V1，那么飞机必须起飞。实际上，V1只有在起飞重量较大时才至关重要，在高速和大重量的情况下中断起飞是危险的。如果飞行员动作迟缓，可能会有刹车过热和爆胎的现象，也有可能会冲出跑道。由于大部分起飞的重量是小于最大重量的，所以在重量减小的情况下，V1就变得没那么重要了。也许使所有起飞保持同样速度的V1看起来合情合理，但事实上，对于一些轻型飞机，在许多跑道上的离地速度（rotation speed，VR，即抬轮速度）都小于最大起飞重量下的V1。因为V1大于抬轮速度是没有意义的（当飞机已在空中时你再决定中断起飞？），所以在起飞重量较大时，许多大型喷气式飞机的V1设置的比VR小几节，在起飞重量较小时V1就等于VR。然而，这使V1变得异常了，当人们认为它会随着起飞重量的增大而减小时，它反而增大了。而双发飞机在起飞滑跑时也比四发飞机更有优势。

正如之前提到的，相比于四发飞机，双发飞机有更高的推重比，可使其应对起飞时单发。在起飞时出现单发，双发飞机会失去50%的功率，相比之下四发飞机只少了25%的功率，且双发飞机在V1后必须能在只有一发的条件下完成起飞。因此，双发飞机在两个发动机都工作的条件下起飞有很大的功率，可以更快加速。结果就是，对于波音777飞

机，在逆风条件下的干跑道上以各种重量起飞时V1与其VR速度相同。有时，在跑道潮湿的情况下可能存在滑水的危险，因为产生于轮胎和道面间的水涟会导致附着摩擦力迅速减少。跑道上的积水、湿雪或积雪只允许达到一定的最大厚度，大于此厚度便不允许起飞。在这种条件下，就算可以起飞也会对起飞重量严格限制，起飞重量会大大减小起飞速度。一些其他方面的技术原因可能也会需要减小起飞重量（见图11—5）。

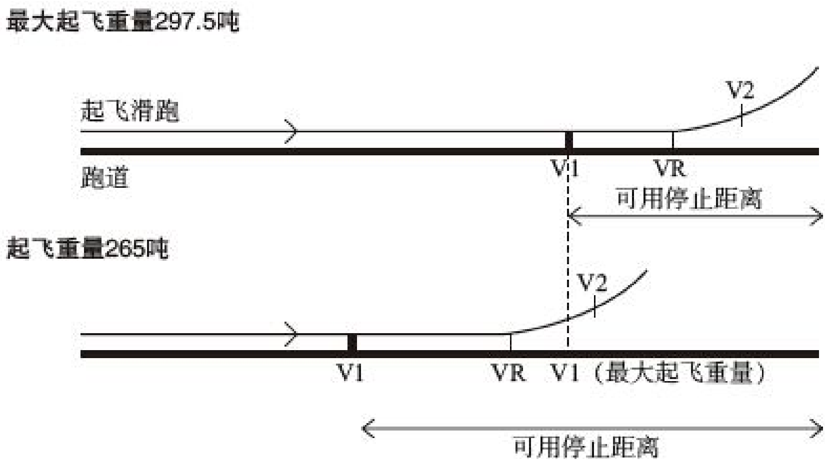


图11—5 起飞重量对停止距离的影响

可以接受的最小V1是地面最小控制速度（minimum speed for control on the ground，VMCG），在海平面约为117节。在一发失效、推力设置为起飞位时，如果仍继续起飞，那么低于地面最小控制速度时就没有足够的气流使方向舵舵面起作用以保持飞机直线飞行。如果V1低于地面最小控制速度，如117节，地面最小控制速度用作V1。VR，即抬轮速度，是在特定重量下的起飞速度，在达到此速度时飞行员把机头“拉起来”至离地所需的上仰姿态。V2是速度达到V1时一发失效所需的安全爬升速度（take-off safety speed）。正常爬升速度是V2＋10~15节。另一个飞行员关注的速度是Vref，即着陆参考速度（reference landing speed）。当襟翼30着陆时，Vref会被标为Vref 30。例如，速度140节，即Vref 30速度，在此速度下，着陆飞机以30襟翼在一定重量下穿过跑道头。[5]起飞后收襟翼速度也基于起飞重量下的Vref 30 计算。各襟翼位置的操纵速度如下：襟翼5，Vref 30＋40节；襟翼1，Vref 30＋60节；零襟翼，Vref 30＋80节。当飞行速度距下一襟翼位置的操纵速度小于20节时可将襟翼收至下一位置。飞行员不需要记住这些操纵速度，因为它们都显示在主飞行显示器的速度带上。

在完成外部检查后，机长再次登机，即刻与客舱乘务组的领导，即客舱乘务长联系，以确认客舱乘务已完成安全检查并就登机时间和旅客广播达成一致。然后机长回到驾驶舱，开始对驾驶舱左侧的设备和仪表进行检查。检查完后，进一步对飞行管理计算机里正确的飞机信息和当

前导航数据库再次进行检查。

为了获得所需航路，飞行员要输入飞机航班号和特定航段，也就是伦敦希思罗–波士顿（LHR–BOS），然后按下“航线请求”按钮把请求通过数据链传送至电脑。不久后，公司电脑将信息传至飞行管理计算机。机长用导航显示器的“计划”方式查看航线，该显示方式能模拟飞机“飞过”整个航路中的每个“航段”。以这种形式上传当天的实际航路，包括所有的大西洋航路点，可确保输入了正确的纬度和经度，也可避免当航路由飞行员人工输入航路时“输入问题”造成的错误。上传加载的航路是“未激活”的，所以经检查后，按下飞行管理计算机上相应的按钮可使航路“激活”并“执行”。导航显示器上的显示颜色从蓝色虚线变为品红色实线，表明航路已激活。

仪表离场程序（标准仪表离场图）已检查过，包含某个特定跑道（27号左跑道）和预期离场程序，在本例中为Compton 3G（CPT 3G）被输入飞行管理计算机并通过查看航图进行核对检查。之后根据飞行计划逐一检查各段的航段距离，再仔细检查所有的海上航路和距离。如果时间较紧，这些可在爬升至爬升顶点后完成。航路“激活”后，一份“风向风速请求”经数据链传送至公司的电脑，之后公司电脑回传在飞行的每个航路点上4个不同高度层的风的情况和周围环境温度，还有下降过程风的预报。核实数据“合理”之后，“执行”数据。输入燃油储备、巡航高度和成本指数（影响飞行速度）这些性能数据。当飞行管理计算机完成加载时，副驾驶会用右边的飞行管理计算机交叉检查详细情况。

在请求开车后管制员才会发出离场条件，但机组已从自动终端情报服务中得到跑道使用情况，机组通常知道他们的航班所需的沿某一特定跑道执行的标准仪表离场程序。当全准备好了后又宣布跑道变更（例如由于噪声影响变换为另一平行跑道，风向改变了，等等）或突然改变仪表离场程序时，起飞数据重新计算、飞行管理计算机重新设置，以及重新考虑离场情况，可能都需要快速完成。

今天，机组可用27号左跑道起飞，用“Compton 3G”标准仪表离场程序离场，这些都会在标准仪表离场航路图上标明（见图11—6）。机组人员要研究这些航路，它们也都显示在导航显示器上，航图也已用折叠夹放在飞行员的侧窗上或夹在驾驶盘上以便对比检查。该离场航路沿跑道方向直线爬升，然后切入伦敦甚高频全向信标台259度径向线。在伦敦甚高频全向信标 259度径向线7 测距仪（7海里的距离）时，右转至磁航迹273度飞到伍德利（Woodley）无方向性信标台上空，然后经磁航迹284度飞至康普顿（Compton）甚高频全向信标台。

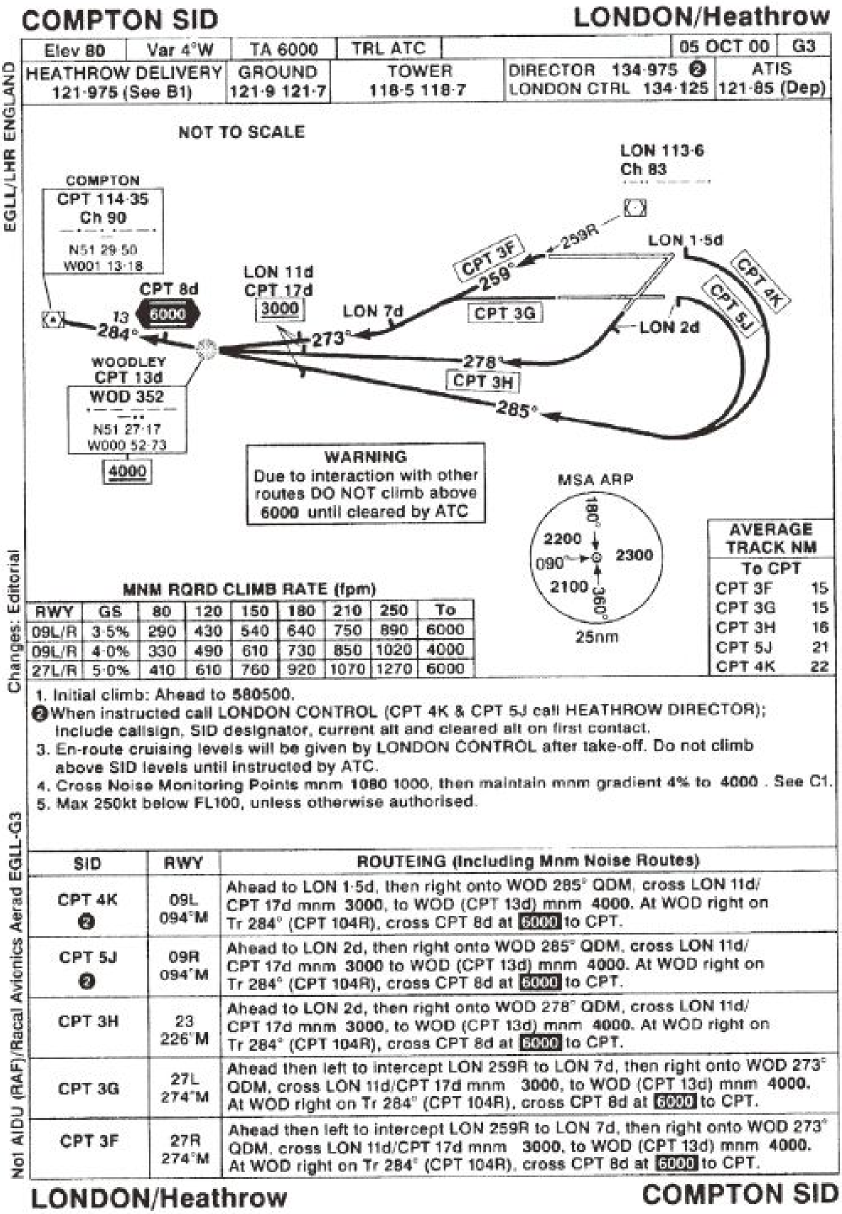


图11—6 标准仪表离场航路图（感谢AERAD提供）

飞机在飞离伦敦11海里时必须达到3 000英尺的高度，穿过伍德利时高于4 000英尺，并在距康普顿8海里、6 000英尺高度上保持平飞，等待下一爬升指示。离场无线电频率（伦敦管制单位）为134.125MHz，它被标记在航图右上方。进场飞机被限制在等待点下降至飞行高度7 000英尺的最低高度，从而保持间隔。这些标准仪表离场程序不仅用来引导飞机飞入航路，而且也被设计用来避开噪声敏感区。除了那些必须由人工选择的无方向性信标台之外，飞行管理计算机自动

调谐和识别所需的信标台，并在导航显示器上显示飞行航路。第一个6 000英尺的高度限制是在自动驾驶方式控制板的高度窗上设置的，导航显示器上的航向选择指示器指向跑道方位，27号左跑道的磁方位是273度。跑道的命名是通过把准确的跑道方位凑整到最接近的以10为单位的整数，然后省略末位数字0。这样 273变为270再变为27，若有平行跑道存在就加上左或右，如27号左跑道。

飞机的离场准备在很大程度上是一项众多勤务的工作，涉及许多设备和人员。燃油要被加至飞机上，发动机滑油和液压油须补满，饮用水水箱要装满，洗手间须清扫，货物和行李应装载，厨房要备好食物，机舱内部须打扫，小故障需修复，冬季时，冰雪须从机体表面除去。准备工作中时常会出现一些困难，这并不奇怪，机长要时刻了解其过程。同时，在时间允许的情况下，每一位机组人员都要准备好飞行途中所需的各类航图并在心里盘算一遍离场程序和航路。座位、耳机和飞行员方向舵踏板也需要调整合适，这些都要花费时间。一完成加油工作，加油人员会将燃油单交给机长进行最后检查并签字。然后检查油箱总容量、发动机指示与机组警告系统上燃油、飞行管理计算机的燃油量和结冰点（约为–40℃或–47℃，取决于燃油种类），并将其与飞行计划给出的作对比。

完成各自的任务之后，两位机组人员现在是第一次一起作为一个团队合作。距起飞大约还有15分钟，副驾驶在阅读显示在下部多功能显示器上的电子检查单。当每一项都用中央操作台任一边的计算机触控鼠标板选定后，该条的颜色会变为绿色。一些项目是“闭环式”的，计算机已经完成对这些项目的探测，这些项目已经变成绿色。机长按照副驾驶念的一条一条地完成动作并回答后，副驾驶用触控板附近的“鼠标型”按钮标记需要被确认且已经过检查的项目。检查单包括了最后检查飞机仪表，选择正确的高度表拨正值，将自动刹车设置在中断起飞，停留刹车刹住。关于自动刹车设置、停留刹车设置、系好安全带和禁止吸烟告示牌等备忘信息，都在发动机指示与机组警告系统显示屏上用白色字体显示。

电子检查单通常按整个飞行过程对检查单排序，包含开车前检查、开车后检查、起飞前检查和起飞后检查等，它是减轻机组工作量的有效工具，但它在非正常情况下才会显示最佳效果。发生非正常事件之后，例如一个发动机失效、液压故障或管道过热等，可以使用电子检查单，适当的检查单会立刻显示出来。例如在进近准备着陆时液压失效，最重要的动作是必须用备用系统放出襟翼和起落架。而传统飞机使用书本式的检查单时，飞行员必须记住在三个不同飞行阶段使用三个不同的检查单才能持续跟踪紧急事件的状况。然而使用电子版本的检查单时，在完成了案例中液压释压的初始动作之后，备用起落架和备用襟翼检查单项目将会被自动添加到进近检查单中。也许几个小时后开始进近时，我们已经忘记液压泄漏这件事了，当打开电子检查单时，所有所需的检查单项目将会显示出来。其他的有用信息，例如提醒机组人员为放出襟翼多留出5分钟，也会被显示出来。

“开车前”检查的另一个细节是机长讲述，它总结讲述起飞和离场程序。讲述的主要项目在电子检查单上有显示，为了确保程序标准化，强烈建议讲述这些项目：最低设备清单（minimum equipment list，MEL）项目（保留的故障），航空情报服务通告，重要天气现象，返航或起飞备降机场、跑道、襟翼、地形和性能限制，扇区安全高度（25英里以内），最低安全高度（minimum safe altitude，MSA）（至爬升顶点），过渡高度（高度表拨正至1 013百帕），标准仪表离场程序，自动驾驶仪与飞行指引系统设置，无线电设备，飞行管理计算机设置，紧急情况，回顾检查任何遗漏或要被添加的项目。下面机长要开始进行讲评了。



装货



厨房配餐

“没有影响起飞的最低设备清单项目，也没有关于希思罗机场（见图11—7）的航行通告。天气情况良好，所以如果不得不返航，我们可以把希思罗机场作为起飞备降机场。起飞跑道是27号左跑道，使用襟翼5，以假设温度49℃做减推力起飞，没有地形或性能限制。扇区安全高度为2 300英尺，最低安全高度为4 300英尺，过渡高度为6 000英尺。

“预期仪表离场程序为Compton 3G。飞行管理计算机与标准仪表离场程序航图一致，图上标明了：直飞切入伦敦甚高频全向信标台的259度径向线。在伦敦VOR/DME7海里时右转至磁航迹273度飞伍德利导

航台，再在伍德利右转至磁航迹284度（康普顿甚高频全向信标台的104度径向线）飞至康普顿VOR/DME台。飞行中有很多高度要求，包括距伦敦甚高频全向信标11海里处须高于3 000英尺，在伍德利导航台须高于4 000英尺。第一个高度限制为6 000英尺，距康普顿8海里时改平飞。

“在起飞过程中若有任何故障，我将喊出中断或继续。速度达到80节后如有任何发动机指示与机组警告系统告警或警报我们将中断起飞。速度在80节至V1之间时如出现以下情况我们将中断起飞：任何部件着火、通过两个以上的参数确认的一台发动机故障、起飞形态警告，或前方风切变警告。

“如果我们中的任何一个宣布中断起飞，我将马上断开自动油门，收油门杆到慢车位，采用最大刹车或监视自动刹车工作状况。你应该做什么呢？”

“我将记录下中断起飞时刻的速度，”副驾驶回答道，“选择最大反推，确保减速板打开，并在减速时报出飞机速度。”（自动刹车设置在中断起飞预位时，飞机在速度大于85节时，自动刹车将会自动地实施最大刹车，但在速度小于85节时必须使用人工刹车。反推打开后，减速板会自动随之展开。[6]）

“当中断起飞时，”“当中断起飞时，”机长接着说，“重申紧急状况，我将要求相应的检查单。如果发生紧急情况时速度已过V1，我们将继续起飞。在大约400英尺高度且起落架收上时我将让你确定故障。我将打开自动驾驶，请你回顾检查单上的记忆项目（如果有的话）。如果发动机失火你要做什么？”“当中断起飞时，”机长接着说，“重申紧急状况，我将要求相应的检查单。如果发生紧急情况时速度已过V1，我们

> 将继续起飞。在大约400英尺高度且起落架收上时我将让你确定故障。我将打开自动驾驶，请你回顾检查单上的记忆项目（如果有的话）。如果发动机失火你要做什么？”

副驾驶回答了相关的问题，机长明确了发动机停车情况下收襟翼高度为1 080英尺（即高于标高80英尺的希思罗机场1 000英尺）。至此，讲评最后一项是回顾任何需要说明的项目。

在自动驾驶仪与飞行指引系统的方式操纵面板上，机组检查确认了跑道方向273度和6 000英尺高度限制已分别设置在航向和高度窗口中，确认水平导航和垂直导航已经预位，且V2速度在速度带上显示。各甚高频全向信标台已按程序调谐好，自动定向仪上调到了伍德利无方向性信标台频率（WOD–352kHz）。

其余的开车前检查单也已完成。燃油泵已确认打开，飞行管理计算机加载已检查无误，检查在发动机指示与机组警告系统发动机指示上部的数字可确认推力已设好，已确认设置了速度，且水平导航和垂直导航已预位。这时，开车前检查单上的所有项目都呈绿色，并且检查单底部的标注显示此检查单已完成。

起飞前6分钟，一位签派人员，也就是大家知道的“红帽子”，在机长结束讲评时将结算舱单送过来。飞行管理计算机的输入由操纵飞机的飞行员来完成，在这种情况下就是机长。 在输入数据的时候，另一个飞行员要独立检查这些输入。副驾驶记录下178.6吨无燃油重量（zero fuel weight，ZFW）的数据，并将数据读给机长，机长在飞行管理计算机性能页面里输入这些数字。加注的52吨燃油已经显示在页面上，经简单相加计算出的总重230.6吨也显示出来，并与舱单交叉检查。减推力的假设温度、爬升推力设置以及加速高度等都已经输入。来自上传性能信息的起飞速度在与飞行管理计算机的数值相比较后也重新计算并显示。所有的速度都自动标注在速度带上，包括计算机计算出来的收襟翼速度。

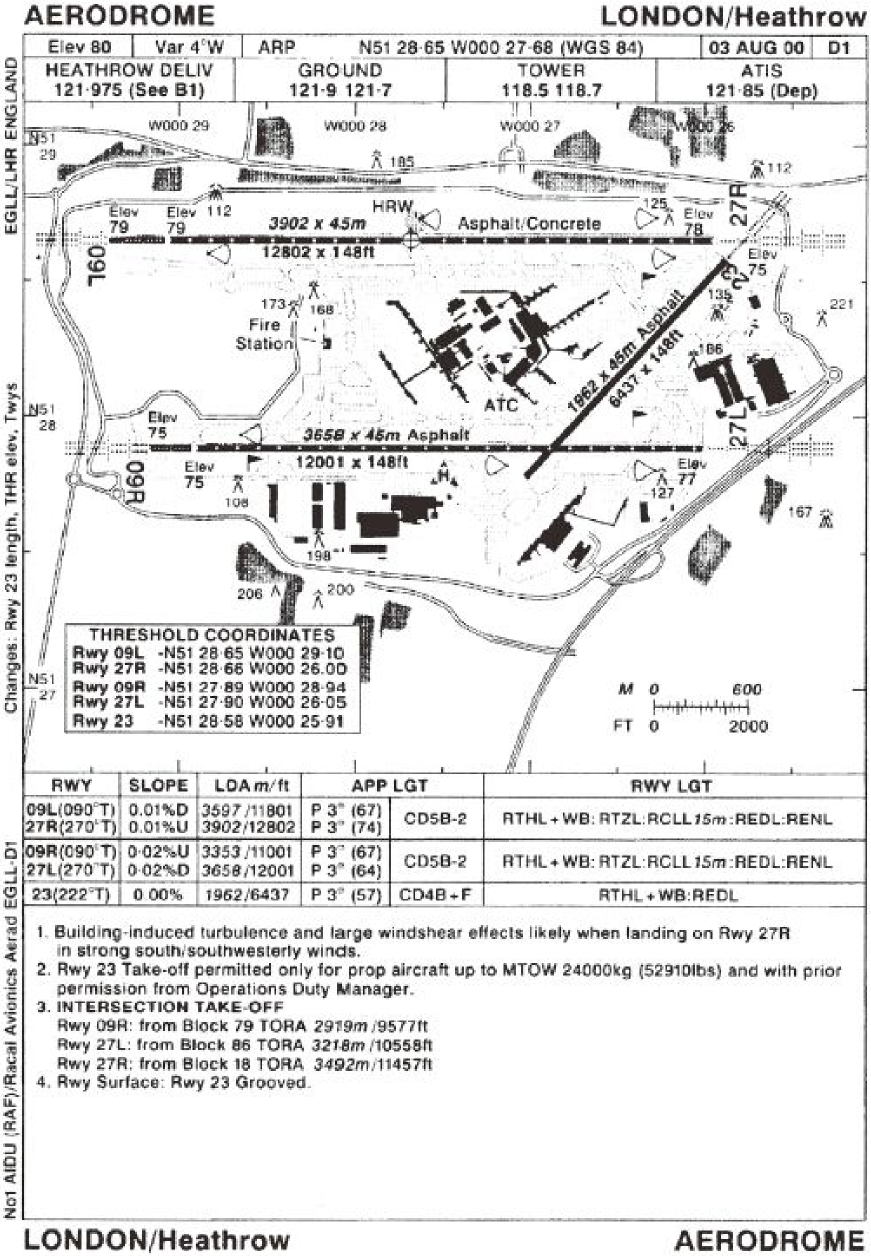


图11—7 伦敦希思罗机场平面图

V1现在显示在速度带的顶部，其他速度将随着速度的增加出现。在方式操纵面板的速度窗口中人工设置V2并自动转移到主飞行显示器的速度带上。飞机的重心（centre of gravity，C of G）通过某个假定点而起作用，为了方便，将它表述为与平均空气动力弦（mean aerodynamic chord，MAC）相关的位置或机翼的平均翼弦。舱单上注明了这个数据，把它输入飞行管理计算机，电脑就会计算出安定面起飞配平设置。

检查完结算舱单和签字后，签派员离去。机长花一点时间通过旅客广播系统对乘客广播，欢迎他们登机。说完后，听到最后一道客舱门沉闷地关上，下方发动机指示与机组警告系统显示所有的舱门都已关好，机组现在开始准备开车程序。机长在甚高频左侧选择121.975 MHz，呼叫“希思罗放行”，请求离场许可与开车许可。

机长R/T[7]：放行，下午好，英航213，停机位T8，波音777，通播S收到，请求开车。

（没有回应。）

机长R/T：放行，英航213，你听我的信号怎样？

（R/T清晰度代码由1到5，1是几乎听不到，5是非常清晰。）

放行R/T：下午好，英航213，我听你5，对不起，我在接电话。可以开车飞往波士顿，CPT 3G 离场，应答机5342，推出联系121.7。

机长回答收到开车许可并复诵许可内容，这都是惯例。机长通过内话与地面工程师联系获得地面管制的开车许可，并确认货舱门已关好并获得地面工程师打开增压液压的许可。凭记忆完成推出与开车检查单：液压面板设置检查，红色的防撞闪灯已打开，通过检查下方发动机指示与机组警告系统的舱门页面确认所有舱门已关闭。按下发动机指示与机组警告系统的重现按钮以确保除了预期的警告或咨询信息之外其他的信息。推出与开车检查单现在已完成，当飞机推出的时候就可以执行开车程序。



推车推出

在可移动、封闭廊桥的停机位，飞机在停放时机头朝向候机楼，这

就要求在滑行前推出。现代推出牵引车不使用推杆，而是通过将飞机前轮抬离地面向后推出。如果飞机前方的空间不够，这类牵引车还被设计为适合在机腹下将飞机推出。推出牵引车还可用于机场区域附近对飞机的牵引。

机长通过左边的甚高频将频率调至121.7 MHz。

机长R/T：地面，下午好，英航213，停机位T8，请求推出。

地面R/T：英航213，可以推出，机头朝北。

副驾驶R/T：英航213，可以推出，机头朝北。

机长通过内话与地面工程师确认所有地面设备已清空，飞机前轮轮挡已撤出，可移动廊桥已退离。

地面工程师：请松刹车。

机长：刹车已松。

当飞机缓缓开始向后移动时，机头下方推车发出发动机轰鸣声。现在时间是格林尼治时间10时51分。（在航班预定时间3分钟之内离场被认为是准点。）地面工程师跟随飞机前轮走并在内话上与驾驶舱保持联系，飞机在推出时发动机启动。

主要发动机参数N1（风扇转速）和排气温度永远在发动机指示与机组警告系统上方显示，次要发动机参数N2（压气机速度）、燃油流量、滑油温度、滑油压力和滑油油量以及发动机振动指示都可以选择在下方发动机指示与机组警告系统显示。波音777安装有自动开车系统，允许发动机电子控制来控制燃油与点火并在发生特定故障时自动中断点火。波音777上如选用普·惠公司的发动机，可以同时点火，但是通用电气公司（GE）的发动机一次只能点燃一台发动机。任何一边都可以先点火，机长现在喊话："右发开车。"把自动点火开关选择为ON，副驾驶旋转开车/点火选择器至开车并将燃油控制电门移至 "运行"（RUN）时，开车程序开始。尽管燃油控制电门已被选择为RUN，系统会阻止发动机燃油阀门打开直到N2转速达到大约27%。系统会监控排气温度、N2转速以及其他发动机参数直到发动机达到慢车转速。

在地面上，自动开车系统在有故障时会中断点火，比如热启动（排气温度过高）、悬挂启动——发动机启动但转速上不去、排气温度不升温、N1不转动、压气机失速或启动机轴失效、气启动机没有足够的空气压力或启动机运转超出时间限制。由于一些这类不常见的故障，启动系统会在发动机启动停止大约30秒以后，进行第2次或第3次尝试，直至中断自动启动程序。如果启动失败，会导致不止一次启动程序，这时飞行员可能会中断自动程序，改用人工启动，但是系统可以把工作做得非常好，飞行员最好坐着看，不要动手，让系统自行工作。不过，这个系统既不监控滑油压力，也不监控滑油温度。在开车时，滑油温度不是个问题，除非低于零下40℃，但是，如果滑油压力不增加，飞行员必须人工

中断启动。发动机首次启动失败是很罕见的。

50%的N2时，发动机现在开始自主运转，启动机转子自动断开，启动开关回到正常位置。排气温度持续升温，到峰值，然后退回慢车水平。左发现已启动，飞机也推出到准备滑行的位置，地面工程师要求刹住刹车。

启动程序现在完成了，两台发动机都在运转，开始实施启动后程序。辅助动力装置开关放到“关”，如有必要，发动机防冰选择为“开”（一旦升空，选为自动，则自动工作）[8]，检查发动机指示与机组警告系统有无任何故障信息。机长通过内话系统与地面工程师进行最后通话并请求地面无障碍信号。推出牵引车分离并开出，地面工程师取下耳机站到安全的一边，垂直举起手臂表明地面无障碍。执行开车后检查单，一人读一人确认，确保所有项目都完成。当舱门关上、刹车松开时，撤轮挡或离场时间已通过飞机通信寻址与报告系统自动发送给公司。接着副驾驶申请滑行指令。

副驾驶R/T：英航213，请求滑行。

地面R/T：英航213，可以滑行。为你左边的757让路，沿着南滑行道滑至27左。

当757滑过时，快速检查飞机两侧以确保无障碍。机长松开刹车，用右手向前推油门杆，左手握住前轮手轮控制方向。发动机保持在一个机动区域的最小推力值以避免吹坏设备或使人员受伤。波音777往往使用慢车动力滑行就够了，但在转弯时可能需要稍微增加点推力。

尽管在空中很优美，波音777在地面上却稍显笨拙。起落架前轮与主轮之间的距离将近26米，机身中线到翼尖是30.45米。转弯的最大滑行速度是10节，滑行道湿滑情况下为6节。时间是10时56分，英航213滑向起飞位置。

滑 行

当飞机开始滑行时，机长喊话：“放襟翼。”这是提示副驾驶开始滑行程序。副驾驶选择所需的襟翼角度并回答：“选择襟翼5。”安定面配平，这是之前就设置好的，再次检查是否在正确设置，方向舵配平和副翼配平检查是否为0，并检查飞行操纵及是否能自由移动。副驾驶操纵驾驶盘及驾驶杆，通过下方发动机指示与机组警告系统的显示确认操纵舵面移动到位，而机长检查方向舵操纵。方向舵脚蹬也能控制前轮转弯在大约7度这个较小的范围左右转动，这在低速度起飞滑跑时使用，因此，机长必须抓住前轮转弯手柄以防止在滑行中检查方向舵时前轮的转动。转弯手柄用作大的转弯，偏转前轮高左右达70度。每架波音777主起落架轮有3根轴、6个轮子。当前轮转弯角大于30度，速度低于20节时，主轮后轴的一对轮子就会朝向相反的方向转动以减轻轮胎摩擦。

在客舱，离场准备和安全须知广播已完成，客舱的乘务长向驾驶舱发出信号报告客舱已准备好起飞。一条白色的“座舱准备好”备忘信息显示在发动机指示与机组警告系统上，每个舱门的绿色A字都显示在舱门状态页面上，已确认舱门都设置为自动。（当选择自动模式时，如果门在特殊情况下打开，救生滑梯会自动放出。）这个时候，发动机指示与机组警告系统备忘录提醒机组收到一条飞机通信寻址与报告系统信息。这条消息包括最终的舱单详细信息。这些数据包括飞机注册号等。大多数情况下，是一条简单的告知“发布1无更改”，发布1是机长之前签署的舱单。这条消息告诉机组配载几乎无变化，可以接受之前设置的性能数据。无燃油重量的任何小变动可以在爬升顶点后输入飞行管理计算机。如果有较大的改变可能需要停下飞机，重新输入数据。要重复在开车前进行数据输入时相同的交叉检查程序。推力和起飞速度的性能数据可能也必须调整，安定面配平也需要重新设置。空中交通管制地面管制员现在呼叫飞机。

地面R/T：英航213，跟着英航的757滑至27左，联系塔台118.5。

副驾驶R/T：收到，英航213，跟着757，联系塔台118.5，再见。

（副驾驶选择118.5 MHz。）

副驾驶R/T：塔台，下午好，英航213。

塔台R/T：英航213，收到，一会儿我叫你，你是第3个起飞。

波音777 IL接近等待点时757滑进跑道并起飞。机长要求起飞前检查。确认飞行操纵装置已检查，应答机编码5342已调好，最终舱单确认已收到，通过发动机指示与机组警告系统检查襟翼设置，最关键的起飞数据确认已设置为计划的跑道和条件，确认配平，客舱乘务长报告确定已收到。

一架印度公司747（呼号印度航空 111）在跑道北边等待，它从中间区域的3号候机楼滑行过来，现已上跑道等待。

塔台R/T：英航213，在印度航空飞机起飞后，进跑道等待，27左。

副驾驶R/T：英航213，印度航空后，进跑道等待，27左。

印度航空111获得许可起飞2分钟后，747发动机的轰鸣声渐行渐远，英航213滑进跑道入口位置。进入跑道时，白色频闪灯、着陆灯都打开，副驾驶通过按下中央控制/显示组件“起飞”页面旁边的按钮告知客舱人员即将起飞，客舱会听到3声响铃。起飞前检查现已完成。英航213已准备好起飞，在跑道上等待起飞许可。

起飞与爬升

不管大型喷气式飞机是大是小，风对飞机起降都是有影响的，如果可以，飞机应尽可能迎风降落和起飞。起飞重量重时，风向或风速轻微的变化都可能很关键。在炎热气候下，温度改变也可能是个问题，即使增加1℃也会导致最大起飞重量减少2吨。在今天的情况下，风向250，风速为15节，风从跑道左侧30度方向吹来，形成13节的逆风分量和8节的侧风分量。抬轮速度为空速150节，因此飞机起飞的地速为137节，这对重重量起飞的飞机有很大影响，特别是在机场气候炎热、标高较高时。当然，抬轮时，主飞行显示器速度带指示为150节。

波音777可以顺风起飞（取决于跑道长度和飞机重量），但是最大可接受的顺风是15节。侧风向量也会影响飞机，如果跑道干燥，起飞最大可接受侧风为40节， 跑道湿滑为25节。（无论湿滑或干燥，着陆为40节。）当然，这些是最大极限，在同样情况下，波音777比大多数飞机性能更优异。所有机动车驾驶员都知道在无屏障区域侧风的影响，如高架路和吊桥，高顶机动车有时会在强风中被吹翻。强风叠加上波音777巨大机身，就像一艘巨大的帆船，垂直尾翼犹如巨大舵面，即使是8节的侧风也是不得了的。因此，在所有侧风的条件下，飞机会以起落架为中心，转向风来的方向。今天起飞有点左侧风，需要向右蹬舵以保持飞机直线滑跑，空速达到65节时，侧风对波音777才有明显影响。安装在跑道末端的橘红色风向袋仍然是一个有用的辅助装置，提供明确的侧风风向指示。风袋被吹起接近水平表明风速为25～30节。侧风造成的另一问题是迎风边的机翼比飞机机身背风的机翼易获得更多的升力，这需要压一些副翼保持机翼水平。在今天的情况下，在开始起飞滑跑时需要向左压驾驶盘大约一个半单位。在40节侧风中，需要向迎风面有8个单位，另外，相反方向的方向舵需要几乎满舵。

印度航空747正在爬升，英航213收到起飞许可。

塔台R/T：英航213，可以起飞，风向250，风速15。

副驾驶R/T：英航213，可以起飞。

机长右手握油门，左手握操纵杆，向左压驾驶盘接近两个单位。使用脚蹬刹车保持飞机原地不动。用于滑行方向控制的前轮转弯手柄不再使用，在起飞滑跑开始时通过方向舵脚蹬进行飞机方向控制。刹车松开时，机长把油门杆推至大约55%N1，计时器开始记录飞过时间。随着油门的移动，主要项目如襟翼或减速板如果不在正确设置，起飞形态警告喇叭会响起。可以看见N1和排气温度的发动机指示上升，当发动机稳定下来后，副驾驶喊话：“发动机稳定。”

机长：起飞推力。

机长按下推力杆上的起飞/复飞开关（take-off/go around switches，TO/GA），油门杆自动向前至起飞推力设置。起飞/复飞开关也激活GPS更新飞行管理计算机的起飞位置。自动油门移动平稳、迅速

和准确，起飞动力已设定。确认了正确的显示后，副驾驶喊话："推力调定。"飞机的加速率非常惊人，在80节的时候自动油门方式转变为保持。这是一项预先设计的安全措施，以防自动油门可能失效导致动力减小。如果此时需要改变动力，飞行员只能手动调节推力杆。副驾驶喊话80节时，机长确认速度带上的速度。蹬着右舵、向左压驾驶盘的交叉控制会使机长感觉略微有些别扭。一些鸟在跑道边上飞着，还有一只八哥从飞机机头下方掠过并快速飞到了安全的地方。（机场附近的鸟一直是个难题，各种驱鸟剂、噪音设备，甚至是猛禽都被使用过来驱鸟。微波辐射会以某种方式影响鸟的羽毛来驱赶鸟，这类设备还正在测试当中。）

飞机在跑道加速，机长通过小量蹬方向舵脚蹬使飞机保持在跑道中线上滑跑。机长右手放在油门上准备在中断起飞时关断它们，左手放在驾驶盘控制受侧风影响的机翼。副驾驶扫视发动机与仪表显示，两人同时都监控空速与飞行进程。在今天的情况下，V1和V2速度相同，当达到V1 ／ VR速度时，无线电自动喊话报出V1，与此同时副驾驶喊话"抬轮"。飞机现在开始起飞，机长将他的右手从油门杆移到驾驶盘上，并向后稳步拉杆。飞机保持以每秒2.5度的速率抬起机头，既不要因太慢而延迟升空，也不要因太快而造成机尾擦地，直到姿态仪显示机头朝上达到大约15度，保持飞机这个姿态。英航213在格林尼治时间11时10分离地升空。

正常重量下，波音777的起飞滑跑需要大约30秒，但若在高原机场以最大起飞重量起飞，起飞滑跑可能要大约40秒，并使用大约3/4的跑道长度。现在，机长可以靠仪表飞行，而不需要多看外边。在50英尺，自动驾驶的水平导航和飞行指引系统自动接通。飞行指引将指引飞行员沿着仪表离场路线飞行。获得正上升率指示时，机长喊话，副驾驶操作，收起落架。（起落架收起程序中，起落架轮舱门先打开，阻力增加，之后小车式起落架收回至轮舱。）座舱"不准吸烟"的告示灯在起落架收上后自动熄灭，但是因为在航班上禁止吸烟，它们的开关被选择在一直打开的状态。起落架收上后还意味着客舱人员可以离开他们的座位，除非有其他指令。爬升速度（假设正常抬轮率离地）是164节，比154节的V2高出10节，该速度要提前在速度窗口设置。设置的爬升速度通过控制飞行指引上的水平指引杆保持飞机俯仰角。飞经100英尺，机长把方向舵放回中间位置，操纵驾驶盘使飞机略转到机头迎风方向。接着，机长沿着垂直飞行指引杆背台航迹飞行，在这种情况下，飞机略向风的来向带偏流角，沿着跑道中线的延长线飞行。高度200英尺时，自动驾驶可能会接通，使飞机能够在整个离场程序中自动飞行。但是，这次机长选择手动飞行离场。

有一些轻微的低空颠簸气流，飞机有点颤动。400英尺时，自动驾驶仪与飞行指引系统的垂直导航自动接通。水平飞行指引杆指示现在基于飞行管理计算机计算的爬升速度所需上仰姿态，自动油门会自动选择所需动力设置从而保证到爬升高度。

接近1 000英尺时，飞行指引引导飞行员切入伦敦甚高频全向信标

台259度径向线飞行。机长操纵跟随飞行指引，左转沿径向线航迹飞行，保持垂直飞行指引杆在仪表中心。上升到机场标高以上大约1 000英尺时，水平飞行指引杆引导飞机低头以增加飞机速度来收襟翼，自动油门自动减小发动机推力至爬升2的动力设置。机长推驾驶杆降下机头，当大约达到185节速度带襟翼5绿指标时，机长喊话“襟翼1”。在襟翼1这个位置，所有后缘襟翼都收回，只有前缘缝翼放出。飞机继续加速，襟翼1绿指标在205节，当速度增加到这个刻度时，机长喊话“收襟翼”，重复上面的程序。

副驾驶：襟翼收回。

塔台R/T：英航213，联系伦敦区调134.125。

副驾驶R/T：英航213，134.125，再见。

（无线电转换频率。）

副驾驶R/T：伦敦区调，下午好，英航213，过2 300英尺，COMPTON 3G离场。

伦敦R/T：下午好，英航213，取消速度限制，爬升6 000保持。（飞机初始速度限制为250节直到空中交通管制许可。）

副驾驶R/T：英航213，没有速度限制，上升6 000保持。

伦敦区调确认标准仪表离场明确的高度，或如果空域许可，指定更高的高度。副驾驶在飞行管理计算机上删除250节速度限制，波音777加速到经济爬升速度310节。飞机现在3 000英尺，爬升良好，在伦敦甚高频全向信标台259度距离7海里，飞行指引引导机长向9海里之外的伍德利无方向性信标导航台飞去。距离伦敦测距仪12海里时，英航213飞越4 600英尺，轻松地飞过最低要求的3 000英尺。

英航213现在飞越伍德利导航台，飞行指引引导机长沿着伍德利284度径向线航迹飞行至康普顿波音777爬升通过5 300英尺，完全在伍德利要求的最低高度4 000英尺之上，当速度达到310节时，飞机自动抬头保持速度。现在开始起飞后检查，副驾驶读出并标注已检查项目，机长监控。计算机知道起落架与襟翼已收上来（这两种情况下，在完全收上之后10秒，发动机指示与机组警告系统指示会从屏幕移除）。所有这些项目在电子检查单上的颜色为绿色。如果没有选择，发动机防冰开关选择AUTO位。

总的来说，在温度低于10℃的可见潮湿气象下预计会产生积冰。探测器感应到冰会自动打开活门，将发动机压气机的热气输送到发动机进气道槽预防冰堆积。因此，在积冰条件下飞行，让冰无法在整流罩上形成，不然积累的冰可能断裂并被吸入，进而损坏发动机。当选择自动时，发动机防冰系统由自身设备决定是否工作。叶片中心的锥体，也就是所谓的转子，由一种特殊的有弹性的材料构成，可以甩掉冰。热气也可以通过与发动机相同的系统自动提供给机翼前缘，但是，因为发动机防冰管道压力较低，机翼防冰被安排在之后的阶段打开。英航213现在进入云层，自动防冰系统探测出冰的形成并启动，在上部发动机指示与

机组警告系统显示绿色的EAI字母，即发动机防冰指示（engine anti-icing，EAI）。

与此同时，到达6 000英尺水平，黄色飞行指引杆现在显示保持平飞所需的姿态。机长略微向前推操纵杆以保持高度，油门自动回收以保持速度310节。机长仍然手动控制飞机，在轻度颠簸气流中有点颤抖，这个时候，他发口令让副驾驶接通自动驾驶，当按下自动驾驶/飞行指引系统接通按钮时，字母CMD（表示控制）显示在主飞行显示器的顶部，确定自动驾驶在工作。水平导航，在起飞后仅50英尺已接通，继续控制飞行进程，并自动指引飞机在航迹上飞行。自动驾驶打开后，机长现在可以松开驾驶杆在自动驾驶的方式操纵面板控制飞机。机长催促副驾驶请求管制人员让他们爬升到更高的高度。

副驾驶R/T：伦敦区调，英航213，6 000保持。

（伦敦R/T区调的雷达上有波音777的高度显示，但是区域内飞机活动多，进一步爬升无法实现。）

伦敦R/T：英航213，保持6 000，稍后爬升。

显然，进场飞机，也许加上前方的印度航空747阻碍了继续爬升。仍在云层中，飞行员确认在导航显示器上显示的气象雷达云图，前方航迹没有积雨云，飞机仍然有轻微颠簸。接近康普顿，伦敦区调许可英航213进一步爬升。

伦敦R/T：英航213，右转航向295，雷达引导至Strumble，爬升至高度层130。

副驾驶R/T：英航213，航向295，爬升至高度层130。

机长将航向选择旋钮转到295，然后按下航向选择旋钮断开水平导航，开启航向选择方式，飞机相应地带着坡度转向雷达给出的航向。英航213在雷达引导下避开冲突，飞机进一步爬升。高度层130被输入高度窗口，高度选择旋钮再次被按下，飞机自动提供爬升推力，自动驾驶引导飞机爬升到新的高度。飞机现在离开伦敦6 000英尺的过渡高度，通过按下电子飞行仪表系统操纵面板上的“STD”（海平面标准气压）选择标准气压1 013hp，并检查2个高度表。“STD”表示标准气压，显示在主飞行显示器的右下方。第三个备用高度表也设置为1 013。随着1 013的设置，起飞后检查单确认完成。

飞过10 000英尺，副驾驶喊话 “高度表检查”，两人确认“离开高度层100到高度层130”。着陆灯现在关闭，当飞机爬升过10 300英尺时，座舱安全带告示灯熄灭。接近高度层130时，飞机收到指令，转换频率到134.75。

副驾驶R/T：伦敦区调，英航213，通过高度层120至130，航向295。

伦敦R/T：英航213，保持航向，爬升至高度层260。

在12 000英尺的高度，飞机冲出云层进入蓝天，当波音777在晴空中平稳爬升时，发动机防冰系统探测没有积冰，并自动关断。英航213被许可直飞到南威尔士的Strumble（STU） 甚高频全向信标台。通过在飞行管理计算机的航段页面顶部选择STU，将直飞指令输入飞行管理计算机，之后与副驾驶交叉检查，然后按下执行键。按下水平导航电门接通水平导航，自动驾驶自动引导飞机直飞Strumble。飞过20 000英尺时，第二次喊话“高度检查”。飞行管理计算机进程页显示飞越Strumble的预计时间为11时34分，现在时间为11时25分，在当前310节的爬升速度下，到达航路点还有9分钟。飞机升空仅15分钟。

接近高度层260时，英航213收到指令联系伦敦区调129.37，管制员许可波音777爬升到高度层310。爬升期间，副驾驶计算出飞行计划航段的总时间以获得到达大西洋入口位置的预计时间。副驾驶在飞行管理计算机上看到到达Cork城的预计时间是11时50分，比飞行计划稍早几分钟，达到航迹Charlie 52N 15W第一个位置的预计时间为12时21分。

机长：你最好请求越洋许可。你呼叫香威克，我保持与伦敦的联系。

副驾驶在右边的甚高频选择135.52MHz，并将所需飞行数据发送给香威克。“预计到达科克城时间是11时50分，到达52N 15W的时间为12时21分，请求航迹C，高度层390，马赫数0.84。”在把飞行具体数据提供给香威克大洋管制中心电脑进行分析的同时，副驾驶保持在频率上守听。同时，在甚高频左侧，伦敦呼叫并许可英航213继续爬升到计划的飞行高度层350。机长确认收到，在高度窗口中输入35 000英尺，继续爬升。指示马赫数随着高度增加而增加（事实上，音速随着温度降低而减小）。当波音777爬升通过高度层300，还有5 000英尺到巡航时，显示在主飞行显示器左下角的指示爬升马赫数实际为0.835，这与同一个屏幕左上方的指令预计马赫数相同。爬升速度现在由指令马赫数而不是由指令空速控制。

几分钟后，香威克发布指令，副驾驶提示机长监听，因为两个人一起收听这类重要信息至关重要。副驾驶复诵道：“英航213可以从52N 15W通过航迹C飞至波士顿，高度层370，马赫数0.84。”并补充当天的航迹信息识别代码为319。（由于有飞机，高度层390明显不可用。）香威克确认复诵正确，并指示英航213调回本土频率。

飞行前准备中的文件包括一条大西洋航迹信息，列出所有当天向西、向东航迹上航路点的坐标数据（经度和纬度），每一条航路都有自己的航路信息识别代码。在复诵香威克许可时，要加上这个代码以确认机组获得正确的航迹C的坐标数据。如果没有向香威克提供代码，需要复诵所有的航迹坐标数据。所有航班并不总是按自己计划的分配到大西洋航线。向西飞的747 在开始飞越大西洋时重量相对较重，往往无法飞达33 000英尺以上的高度，有时候可能飞得更低。在繁忙的北大西洋，这是个劣势，可能会导致航路的更改。然而，波音777可以更早飞到更高的高度，很少出现航路更改。

现在，飞机在350高度层上平飞，飞越了Strumble，飞机自动转向航迹274，沿着UB10航路的中线向Banba飞去。在高度层350，主飞行显示器右上方正中的飞行模式告示牌上的VNAV　PTH（垂直导航航道）呈绿色，表明垂直航道已获得。飞行方式显示器的自动油门栏上显示“速度”绿色，油门减小并保持0.835的巡航速度。

副驾驶R/T：伦敦，英航213，现在高度层350。

伦敦R/T：收到，英航213，呼叫香农 131.15。

巡 航

现在时间是11时34分，爬升至高度层350花费了24分钟，飞行了179海里。现在，飞机重量刚超过225吨，有5吨燃油耗费在爬升期间。

副驾驶R/T：香农，英航213，下午好，高度层350。

香农R/T：英航213，下午好。雷达看见你350飞越Strumble，直飞52N 15W，如果可以，告诉我预计时间。

副驾驶R/T：英航213，直飞52时15分，预计时间12时20分。

飞行管理计算机给航路点52N　15W的代码为5215N。按下飞行管理计算机上与这个坐标数据相邻的行选按键，5215N由当前位置从航段页面的中间移到页面顶部。执行键亮，一条从当前位置到5215N的虚线显示在地图上。与另一名飞行员确认后，按下执行按键，飞机转向新的航迹。

ShanonR/T：英航213，当能够爬升370请告知。

副驾驶R/T：英航213，我们现在可以爬升370。

ShanonR/T：英航213，爬升到370，到达报告。

副驾驶R/T：英航213，爬至370，到达报告。

在高度窗口中拨37 000，按下同样的选择器，将370传送至飞行管理计算机。飞行方式显示器告示牌转变为THR（自动油门）和VNAV　SPD。发动机推力增加，飞机以0.835的马赫数爬升。到达370，告示牌又恢复为速度和VNAV　PTH。当到达高度层370时，在飞行管理计算机中输入大洋巡航速度M0.84，油门杆收回到所需的0.84巡航速度的动力设置。在右边的甚高频，选择应急频率121.5MHz并且保持守听。

波音777现在开始穿越大西洋，在进入最低导航性能区域（minimum navigation performance sector，MNPS）之前，最低导航性能区域从15W开始，从那里开始机载设备至少需要两部惯性基准系统。检查位置信息可在导航地图显示上选择10海里的地图显示范围，按下电子飞行仪表系统位置选择器，就会显示GPS位置，它应与飞行管理计算机顶部显示的三角标识重合。甚高频全向信标径向线与测距仪台的

相对关系测定无线电位置。所有这些位置通常位于大约1～2海里半径的小区域范围内。

飞行航线图（大西洋区域地图上经、纬度网格及导航信息）现在显示英航213大西洋航迹以及在YHZ（Halifax机场）和SHA（Shannon机场）之间的等时点（equal time point，ETP）[9]（见图11—8）。在飞行管理计算机的“定位点”页面上输入这两个机场，这样到每个机场的航迹与距离就会持续显示。同时，在飞出这个区域之前，飞机通信寻址与报告系统通过甚高频数据链接接收香农、 凯夫拉维克 、哈利法克斯及其他任何相关机场的实时天气报告。之后也可在大洋上使用卫星通信，但是费用贵一些。

英航213现在接近52N 15W航路点，导航显示器及电子飞行仪表系统上的“位置”键都可用来检查飞机位置。飞行管理计算机的位置页面也可以检查位置的正确与否。在飞行管理计算机的“航段”页面，对照飞行计划检查下两个位置。飞过52N 15W后，飞机自动转向新的航向开始进入真航迹254飞往51N 20W。这时对照飞行计划，检查到下一个航路点的真航迹与距离是否一致。

副驾驶R/T：香农，英航213，15W 时间12时20分。

香农R/T：英航213，联系香威克 127.9。

副驾驶R/T：收到。127.9。

副驾驶在左侧无线电选择127.9，呼叫香威克。

副驾驶R/T：香威克，英航213，位置报告。

（香威克回应，副驾驶传送位置报告。）

副驾驶R/T：英航213，位置52N 15W，时间12时20分，高度层370，预计51N 20W时间12时45分，下一个位置点51N 30W。

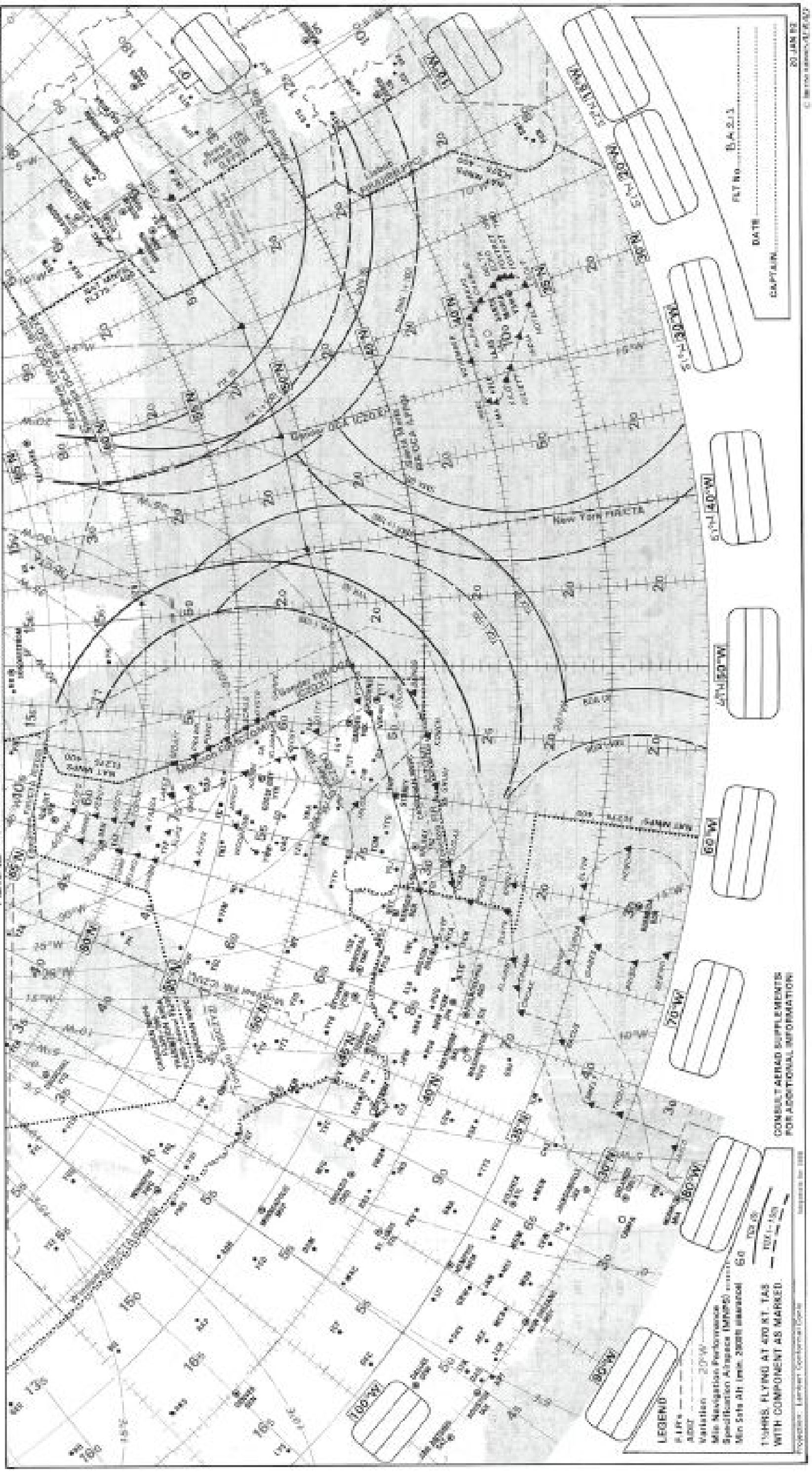


图11—8 标有延程计划航路的飞行进程图

香威克复诵收到的时间和预达时间，指示英航213在20W航路点通过高频联系，主频率8 879rHz或辅助频率11 336rHz。

副驾驶选择并调左侧的高频到频率8 879rHz，然后用飞机的选择呼叫代码GK–HR呼叫香威克，做选择呼叫检查。地面回应是一声“叮咚”音，无线电台选择盒上的“呼叫”指示灯亮起，确认运行，同时发动机指示与机组警告系统上出现白色备忘信息。在知道香威克可以通过铃音呼叫机组后，机组现在可以取下耳机，扬声器声音调大以保持对121.5MHz的守听。左侧甚高频无线电现在调到123.45MHz，这是空中飞机之间互通信息的频率。在巡航期间，手持话筒如工作正常，用它通话很方便，这样，用扬声器收听，用手提话筒发话。手提话筒在15 000英尺以下禁止使用。机长现在检查到达波士顿的时间并准备对旅客广播。作旅客广播时，机长既可以选择音频操纵面板，通过耳机讲，也可以使用中央操作后面的“电话类”座机。音频操纵面板上，可以选择不同的无线电接收与发话，很多机长由于选择疏忽，把旅客广播播放给数十架正在守听这个无线电的飞机。为了避免这类尴尬，机长拿起电话机开始讲话。

> 女士们，先生们，下午好。我是机长，我相信这是一次舒适、愉快的飞行。我们现在在37 000英尺的高空平飞，在爱尔兰西部250英里处，接下来还有5小时45分钟的旅程。预计按计划到达波士顿的时间是波士顿时间下午1点20分。那些愿意将表调成波士顿时间的朋友们，现在是上午10点05分。我们今天沿大西洋航路到北纬51度、西经30度，这是越大西洋的中间点，之后飞往加拿大东海岸的纽芬兰。接着我们会飞越圣劳伦斯海湾，向下飞过新斯科舍[10]，飞越美、加边界，飞越缅因州的班戈市上空，然后飞到波士顿。航路天气应该不错，尽管时不时有点小颠簸，波士顿的天气预报为阴天、微风，可能有阵雨。考虑到有意想不到的颠簸气流，请大家在座位上系好安全带。我将在到达纽芬兰时为大家提供飞行的最新进展。祝大家旅途愉快。

接近20W，再次确认当前GPS、飞行管理计算机和惯性基准位置，以及下一个航段的航路点。12时45分，飞机自动转弯飞向30W。检查惯性基准提供的真航迹、到达20W的时间，并在飞行计划上注明51N 30W

的预计时间。副驾驶用高频向香威克传送位置报告，也报告给甘德。（30W之后，甘德负责管制，在那个位置也要同甘德进行选择呼叫检查。）

副驾驶R/T：香威克，英航213，频率8879 位置报告。

（香威克回应后，副驾驶继续。）

副驾驶：香威克，同时甘德，位置，英航213，51N 20W 时间12时45分，高度层370，51N 30W 时间13时30分，再下一个点51N 40W。

飞行超出雷达覆盖范围，因此选择标准应答机编码2 000。外面的空气温度显示为零下47℃，航行风显示为真方位270度，风速35节。完成了燃油检查。从发动机指示与机组警告系统显示器抄下剩下的机载燃油总量，以及从20W飞达目的地所需燃油，这些之前飞行运控计算机已经计算并打印在飞行计划表中，只需要简单减去油箱燃油量就可以得出抵达时可用的燃油。在飞行管理计算机进程页面上，到达目的地所预计的机载燃油持续显示，用以上程序作一个交叉检查并记录详细情况。显而易见，目的地最低燃油值需要考虑由于恶劣天气导致的改航，以及强逆风或低飞行高度这些不利情况，燃油储备太少也可能需要提前在备降机场着陆。因此，在整个飞行期间要仔细监控燃油状况，在飞越的每个航路点都要检查燃油。

机组飞行已经超过3个小时，离下个位置报告点还有45分钟，现在第一次有机会休息一下。飞行机组成员之一必须不离开座位并系上安全带监控飞行进程并处理可能出现的任何特殊情况，另一个机组成员可以自由活动一下，伸展双腿几分钟。在这个阶段，飞机平稳飞行，大部分的飞行都是自动的，而机组的主要职责是监控。每个航路点都要检查航行情况，要经常扫视飞行和发动机指示，检查系统是否正常运行，持续监控飞机速度。

巡航期间眼睛没有必要一直盯着仪表、显示器看，因为许多诸如发动机指示这类都与其他显示纵向对齐排列。任何与机组时时刻刻熟悉的显示有所不同的异常都很显眼。下方发动机指示与机组警告系统屏幕通常在巡航期间保持空白，如果出现任何故障问题，相关的显示自动出现，或者更具体的系统详细图显示在屏幕上，显示每个活门、电门或续电器的位置。要随时对照检查飞行计划，按无线电通信要求报告位置，有间隔地通过无线电广播接收目的地天气条件，并留意航路上的不利天气。很明显，飞行机组在巡航期间难以像阅读一本好书那样放松，只是在监控进程时，可以偶尔看几眼杂志，或者在没有影响飞行安全的不利因素下玩玩古怪的猜字谜游戏。当然，飞行可能班班不同，有的航班行程中机组可能什么情况也遇不到，而另一些机组可能一直忙于应对飞行中的天气避让，处理意想不到的航线改变、繁忙的无线电通信、监控目的地不利天气报告或重新计划飞行燃油储备，等等。

长途飞行中，一个系统被发明出来监控飞行员的警戒性。如果在一定时间发现机组没有动作（飞行管理计算机运行、系统监控、自动驾驶

功能或无线电使用等），发动机指示与机组警告系统屏幕上会出现建议信息。为了应对这个系统，一个机组成员必须取消信息或者触摸其中一个监控的系统操纵装置，但是如果几分钟后系统没有发现有飞行员的动作，这个系统会在发动机指示与机组警告系统上显示警告信息并伴随着警告音。再过一段时间，如果这也没能引起机组的回应，发动机指示与机组警告系统会发出尖锐的警告音，即使没能唤醒机组，也保证能唤醒机上所有的乘客。

从非洲到澳大利亚的热带，大型的积雨云可以衍生到60 000英尺，在雷雨天气活跃区域，伴随着飞行中的颠簸，长时间的因天气绕航会令人厌倦且疲惫。在飞机活动繁忙的北大西洋，飞机通常别无选择只有保持航迹和高度，安全渡过所有颠簸气流，好在这个区域很少出现恶劣天气。在一些偏远地区，偏离航线50甚至是100英里以避开大范围积云天气也并不少见。白天，如果飞机没有在云层中飞行，大型的积雨云很容易被发现；夜间，闪电的强光在几百英里以外也能被发现。飞行员在自动驾驶仪上接通航向选择方式，一边注视着气象雷达显示屏，一边驾驶飞机小心翼翼地在雷暴云周围穿行以避开最强烈的颠簸。巨大的雷暴云会导致飞机严重颠簸，为了保证安全和乘客的舒适性，要努力将其避开。（波音777的最大机动载荷是＋2.5g到–1.0g之间，“g”指重力，带负号的“g”指失重影响。）在导航显示器显示的气象雷达雷暴位置的画面与同时显示的洋红色飞机航迹在绕飞雷暴云时特别有用，尤其是当有气象雷达画面的导航显示器且距离选择在160海里内时。

在北大西洋航线上，航迹不是沿大圆航线飞行而是根据盛行风时间选择最佳航路。但是，当沿航迹从一个位置连向另一个位置时（比如说从55N 20W到56N 30W），飞行管理计算机给出大圆航线 （地球上两点之间的最短距离），当飞机保持大圆航路时，罗盘显示航向会持续有变化。在大陆上空，航路很少有长距离的直飞航线，而是按传统的航线设置，在位于机场、城镇，或者国界上，从一个无线电信标台飞到另一个台，许多航路都很短。当然，如果飞行管理计算机开启，那么飞机还是在信标台之间按大圆航路飞行，但是都是短的航段，几乎没有省下的时间。航路宽度是10海里，如果飞行管理计算机开启，一般来说，沿航路中心线的飞行是精准的，特别是当通告GPS 信号的自动更新可用时。实际上，在引入飞行管理计算机之前，由于航路上的信标台电波不稳定，以及在偏远地区传统导航方法的不精确性，飞机的偏航是很多的。当今的精确导航可以使相对飞行的飞机各自保持精确航迹，以更小的间隔擦肩而过。保持飞机之间间隔是至关重要的。

由于世界上很多地方都没有雷达覆盖，良好的窗外观察便是飞行员的责任。红色极亮的频闪防撞灯一直都是开启的，从任何角度都可以看到。大多数飞机的翼尖上都安装有频闪灯，极其明亮的白闪灯放射出的光，数英里之外就可以看到。夜间，开启的航行灯光也能帮助你发现飞机。这套系统改自海上的航行灯光系统。左舷灯光为红色，右舷灯光为浅绿色，船首、尾灯光为白色。“没有剩下的红色左舷”作为一句提示语提醒船员红色指的是左舷和左边。有些恒星和行星闪烁着明显的红绿

光，有时候会被误以为是远处的飞机。被闪烁的星星迷惑的飞行员可不止一个呢！尽管航行灯、防撞灯光如今看起来过时了，但是在监控附近飞机运动时它们仍然是必要的设施，特别是在夜间雷达不可用的时候。在观测过程中，如果另一架飞机的灯光相对于你在运动，两架飞机应该能够安全通过；但是当你观测到的灯光貌似静止时，肯定是有相撞的危险，那可能就得改变航向了。着陆灯也是一种有用的防撞辅助系统，不仅在滑行、起飞和着陆时会使用，而且在10 000英尺以下都可以使用。甚至在白天，打开着陆灯可作为“看见和被看见”的预警，甚至能避免鸟撞。

在某些地区，离开航路的直飞航线是可用的，但是仅限于雷达覆盖良好的地区，比如说欧洲和北美。当飞机在航路上时，如果GPS 失效，信标台会自动调谐来更新飞行管理计算机的进程。从地中海到远东的敏感地区，飞机要求精确地遵守航路系统。无线电报告显得繁琐和形式化，并且飞机有时要求在进入空域之前获得许可。有时候，需要同时守听两名甚至三名交通管制员，比如说在塞浦路斯上空，土耳其、塞浦路斯和大马士革的管制员都要求位置报，而三方之间却从不联系。

某些航程要求提前重设已知的航路，比如说从欧洲到东方的航班必须避开南斯拉夫空域，这就会增加这次飞行的距离和时间。在战争敏感的地区，比如说中东或者波斯湾，不定期的航线变化或者高度改变是很常见的，这些都会增加机组的工作量。空管人员罢工和怠工也会增加飞行员的工作压力，这些年欧洲已然经历了这些纷扰。延误无疑会导致机组执勤时间延长。

目的地、改航以及航路机场的天气预报和实际的预报可以通过高频广播抄收或者使用飞机通信寻址与报告系统通过卫星通信数据连接得到。如果进场阶段预计有恶劣天气，在整个航行过程中都要注意天气预报，以期改善。卫星通信也可以用作电话与公司保持联系。由于目的地天气恶劣面临改航的情况时，需要检查到达改航机场的航线和燃油要求，或者寻找基于天气报告的其他可能更合适的机场。前往改航机场的航路信息作为“航路2”输入飞行管理系统的航路2页面。当繁忙的目的地机场因恶劣天气关闭时，紧随其后的组织混乱令人难以置信。每个飞行员都在同时四处寻找开放机场，都想早做准备，以防不测。

紧急状况

在格林尼治时间13点35分时，飞机转弯飞过51N 30W，这是北大西洋中间穿越点，以初始真航向274度沿大圆航线飞向51N 40W航路点。现在科克城已经在身后两个小时了，再向前飞两小时抵达加拿大的纽芬兰省海岸。在大西洋中间穿越点也就是两岸的等时点，它是考虑风量计算的一个在前方机场和返回机场之间的等时位置，以防在海上发生紧急状况。在离场前准备中，香农和哈利法克斯机场的天气都较好，双发延程飞行备降机场天气都在最低标准之上，并且计算机算出的两地之间的

等时位置是格林尼治16点25分（飞过30W后48分）。如果在此时之前发生紧急状况，返回香农就会快些，之后则继续飞往哈利法克斯。

但是如今紧急状况很是罕见。虽然机组受过应对任何突发情况的训练，但是现代设备极其稳定，很少出故障。为了保持标准，飞行机组要求在模拟机上每年练习两次紧急程序。模拟机是个完全的模拟飞行的地面设备，早期使用的模拟机被指责为“一团乱麻，上下晃动”，但是现在的模拟机精准地复制了特定驾驶舱运行模式，是高度精密复杂的设备。现在的模拟机可以全方位自由运动，带有非常真实的视景显示。

曾经，所有航空公司的训练都是在真飞机上完成的。但是由于那时发动机实际失效次数大大多于训练发动机失效的次数，此类训练就逐渐转向模拟机了。如今的航空公司，所有训练，包括仪表飞行检查和驾驶舱程序复训（不管是初始进入训练还是机型改装）都在模拟机上完成。有经验的喷气机飞行员的改装课程，比如说从波音757改飞波音777，都是在先进的模拟机上完成训练的。在波音777飞机上零飞行时间，便直接进入教员带飞的航线飞行。



波音747–400飞行模拟机

模拟机提供了有效、安全并且廉价的训练。在地面上相对较短的时间里可以得到长达一生的飞行经验。因为现代模拟机逼真度非常高，机组接受训练可应对各种在飞行中可能永远不会遭遇的情况。尽管在训练中模拟机有很大用处，然而也必须认识到，真实的飞行经验是无法替代的。飞行员可能在模拟机上遇到复杂情况时也会紧张出汗，但是这汗水代表的意义不同。在空中，真实飞行中的问题会让人肾上腺素飙升。偶尔害怕一下的飞行员才是最安全的。

所有大型喷气机的机载飞行数据记录器会记录整个航程中的很多飞行参数，驾驶舱语音记录器（cockpit voice recorder，CVR）持续记录最近半小时的驾驶舱对话。飞行数据记录器位于机尾，这是飞机最结实

的地方。记录器可以承受5 000磅的冲击、100g载荷以及1 100℃的高温。（这就是所谓的“黑匣子”，实际上它是橘红色的，便于寻找。飞行数据记录器内装有小型的发射机，事故后的几天时间内持续发出信号，协助搜救队伍找寻。）详细记录事件和紧急状况的细节可供日后分析。驾驶舱里有大量的目视和音响的警告会在故障或者失效时向机组告警，如灯光（闪烁或者持续亮）、铃声、喇叭、笛声、嘟嘟声、叮咚，以及带声音的告警灯或者语音警告。屏幕信息以琥珀色显示表示小的故障，红色显示表示更为严重的结果。所有程序，无论是查寻故障、预警，或者紧急状况，都要按检查单仔细完成。但是有些紧急情况需要按照记忆项目马上采取行动。不过，人们心中那些喷气机飞行员快速反应、动作迅速，以及在训练时比拼的影像远不是真实的。大多数情况下，在采取措施之前，机组需要仔细研究情况，甚至可能进行较长时间的讨论。只有一些情况例外，如在起飞时遇到发动机故障的情况下需要机组迅速决断并作出反应。

发动机着火是潜在的最严重的事故，此时发动机着火的信息会在发动机指示与机组警告系统上以红色显示，同时警铃声响起。主警告灯闪红光，并且在相关的发动机灭火与燃油控制电门上有红色灯光闪亮。机长发出指令，“左发着火检查单”，副驾驶开始按记忆执行灭火程序，与此同时，机长控制飞机，监控记忆动作，并负责无线电通话。相关的自动油门电门关闭（波音777每个发动机都有一个），相关的油门杆收回，燃油控制电门关断，有效地切断燃油供给。如果发动机火情继续，拔出灭火开关，断开失效发动机系统。将此开关旋转30度以释放合适的灭火系统。如果30秒后发动机火情信息仍然存在，将灭火开关旋转至相反位置，使用第二个灭火瓶以释放更多灭火剂灭火。诸如起飞时发动机失效的紧急状况要求飞行员具有分秒必争的决断力并采取积极的应对措施。起飞时大功率设置下的发动机失效通常会导致发动机故障伴有一声巨响。

起飞还是中断起飞的决断速度被称之为V1，在此速度之前，有足够的跑道可以让飞机停下来。在V1之后，剩余跑道长度不够，飞机就必须起飞。在接近V1时中断起飞是非常危险的程序，要作出这样的决定也非易事。当出现紧急状况时，比如说，在达到决断速度之前发动机失效，机长立即喊出“停”，关闭油门，同时使用最大刹车，或者监控自动刹车工作。副驾驶选择反推慢车，检查扰流板是否放出（如果需要放出的话），并且，如果速度大于100节，选择使用另一工作正常发动机全推力反推。以最大重量起飞时，决断速度可以超过150节，在这个速度上停下来会产生巨大的刹车热能量。刹车肯定会过热，这就会有着火的危险，需要数小时冷却。机轮上装有可熔化的气门插销，在350° F[11]的时候会熔化，把机轮中的空气（实际上是氮气）释放出来防止爆炸。

有一种空中紧急情况对机组和乘客来说都是令人惊恐的，那就是由于压力系统失效而导致的瞬间失压、窗户爆开，或者机身蒙皮被击穿。当座舱失压时，由于压力迅速下降，座舱内的湿气瞬间凝结，产生雾气，使座舱的能见度降低。在10 000英尺以上，由于缺氧，人的行为能

力开始减弱，遭受失压的人会对自己的能力产生错误的自信。大脑组织缺乏氧气的状况医学上称为缺氧。在35 000英尺瞬时暴露在稀薄大气中，人有效的意识不到30秒。当出现此种情况时，座舱的氧气面罩从顶板自动落下供乘客使用。机组带上氧气面罩，并且保证彼此能够交流。自动压力开关会触发乘客氧气面罩落下，但也要使用驾驶舱里的乘客氧气面罩开关作为备份。在低高度上氧气供应足够乘客和机组短时间使用，但是在高高度上会迅速耗光。

当然，氧气系统的任何失效也会非常危险，所以此种情况被认为是很严重的。首先应该千方百计恢复座舱高度，复原正常座舱压力。但是如果做不到，就要开始紧急下降。机长在高度窗口选择最低安全高度和15 000英尺两者中较高的一个，并按下飞行高度层改变按钮。自动驾驶保持接通，机长将减速板拉至飞行卡位置，推力杆收到慢车位，并将空速选择器拨至最大速度，使之刚刚接触到速度条上的红色区。然后将飞机转弯偏离航路，机头朝下，直至到达所需速度。此时，飞机下降率为每分钟6 000~7 000英尺。在安全高度上将飞机改平，并改航至最近的适合的机场。在15 000英尺以下，有能力的乘客可以不用氧气面罩来呼吸，但是飞行机组必须保持氧气供给直到飞机下降到10 000英尺以下。

紧急程序还包括客舱着火训练（可用于各类火情的卤化烷灭火器和用来扑灭纤维物深处火焰的液体水灭火器，置于飞机内部各个位置），货舱失火演练，驾驶舱和座舱排烟演练，单发进近和着陆演练，部分主起落架演练（即一个起落架无法放下），系统故障，襟翼、安定面和飞行操纵失效，以及其他种种。电子检查单包括所有的正常与非正常程序。纸质的检查单册子，通常称为快速检查手册（quick response handbook，QRH），保留着作为电子版的备用，而且它自身就是一本小手册。

飞行机组失能是飞行员都意识到的问题，也要在模拟机上训练。此类情况很少见，但是医学上的并发症和食物中毒曾经夺取人们的性命。（所有驾驶舱的食物都是由独立的配餐商准备的，而且机长和副驾驶在不同时间吃不同的餐。）一名机组成员能够驾驶波音777着陆，但是在正常条件下不会这么做，这种情况下电子检查单就会难于操作。向管制员宣布紧急情况，给予未失能的飞行员所有的帮助和要求的时间。有一次，一个外国航空公司的机长在飞行中突发痢疾，有乘坐飞机旅行的医生建议他服用三片药以减少他频繁上厕所的痛苦。机长不愿意服药，但是在医生的压力下最终同意吞下了两片。但是，医生错误地给了飞行员两片安眠药，这名机长很快就在座位上呼呼大睡，在着陆后数小时才在机场的医疗中心醒过来。

当飞行操纵系统发生故障，飞机主要的系统失效或者起落架出现问题时，就可能要进行迫降，宣布紧急情况。这时所有服务，消防、警察、救援、医院，都被调动起来。（这些机构定期实施演习以检验处置此类情况的能力。）此种紧急迫降实为罕见。即便飞机安全落在地面，也需要各种应急。例如，主起落架若显示“未放下锁住”，按要求应开始紧急迫降程序，并向有关当局告警，但是通常的结果是飞机会安全无忧

地着陆。着陆时发动机起火要求消防服务，飞机一旦停下来，紧急疏散几乎是必要的。事实上，着陆后发动机起火或油箱破裂起火，往往是紧急情况中最危险的情形，此时，通常需要尽可能迅速地执行紧急撤离。测试已经表明，如果燃料箱在冲击时破裂，所喷射的燃料会被气流剪切成高度易燃的雾沫。目前正在开发一种具有较高分子量的聚合物添加剂用作防结雾的材料，以期降低飞机撞地后燃油立即起火事故发生的风险。起落架收起或部分放下，是一种独特的紧急着陆情况，在某些机场，可在跑道上铺设泡沫以消除火花，减少发生火灾的危险。

在紧急情况下，如果着陆后预计要进行紧急撤离，要指导乘客为此做好准备。眼镜、领带、假牙和鞋子都应取下。将座椅调整到直立位，以防止后面乘客受到前排座椅的撞击。并且为保护乘客在撞地反弹时不受伤害，还要收起小桌板。在起飞和着陆时，把手提行李存放在座椅下面或放在头顶的行李箱中是非常重要的，能确保过道和门口保持通畅。紧急迫降程序要求副驾驶在最后进近阶段1 000英尺时，使用旅客广播系统通知客舱机组回到自己的座位上准备着陆。乘客将被告知：系好安全带，身体向前倾，为了保护头部，请双臂交叉抱头，放在大腿或软垫上。距地面200英尺时，副驾驶喊话“抱紧、抱紧”，乘客高度紧张，准备着陆。如果紧急情况是起落架故障，或发动机、客舱失火，并且火势蔓延的风险是可预见的，则在飞机停止后立即开始紧急疏散可能是明智的。第一个动作，停留刹车刹住，然后飞机释压，关断发动并且释放灭火瓶。使用乘客广播系统下令撤离并打开疏散乘客撤离信号。看到信号，客舱乘务员打开舱门，逃生滑梯自动放下。指导乘客以先跳后坐的姿势从滑梯上逃生。一架满载乘客的喷气机通过此系统可以在90秒内疏散完毕（假设只有一半的出口是可用的）。

紧急迫降的准备和计划在飞机飞行于荒无人烟、远离机场的地区，例如，飞越南北两极的航班时，要搭载包括极地服装、煤油炉、雪铲等极地救生设备。位于客舱后面的座位被拆除，北极生存设备在限制网下被绑在地板上。因为大部分地球表面都被水覆盖着，预计需要水上迫降。虽然现在水上迫降极为罕见，但是所有飞越水面的航班都载有救生衣和滑梯/救生筏（见图11—9）。救生衣通常放在每个座位下面，每个主门都有滑梯/救生筏，一物两用，当门打开时可以自动充气。一旦漂浮在茫茫大海上，有一个遮篷可以竖立安装在飞机两边起保护作用。当在海面上降落时，机组人员要求尝试将飞机顺着主导的海浪，顶风在次级海浪降落，或顺风着陆，顺着次级海浪降落。飞机以全襟翼正常速度着陆，但要收起起落架以平滑的机身接触水面。水上迫降之后，飞机停留在水面上，打开舱门，滑梯/救生筏自动打开。搭载着乘客、机组、生存包、紧急信标（竖起天线后会在紧急频率121.5MHz发出求救信号）和急救包，滑梯/救生筏可以与机体分离，漂流离开下沉的飞机。一旦脱离了飞机，大家应努力一起划动救生筏，以期救援。

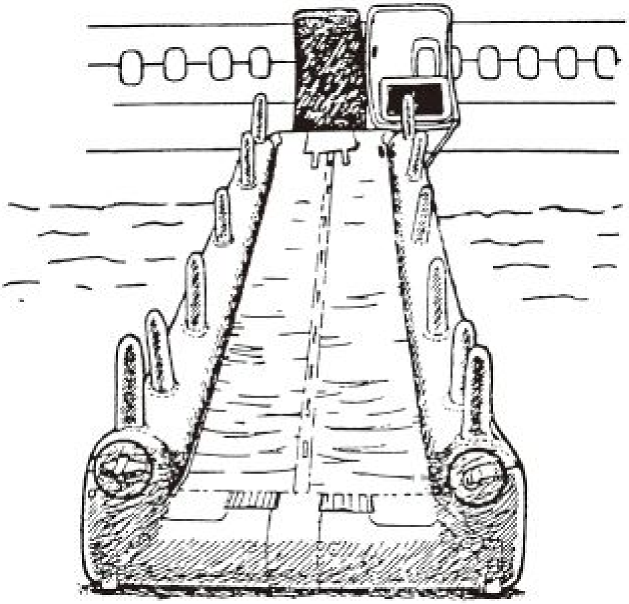


图11—9 逃生滑梯/救生筏

机组还要接受另外两种紧急状况的训练，即劫机和炸弹威胁。第一起民用航空器非法干扰的案例发生在1930年的秘鲁，一群革命者占据了一架F–7飞机，要求逃离这个国家。然而，直到20世纪40年代末和50年代初，有记录的劫机事件才频繁发生。当时，一些逃离铁幕国家的人，犯下了大概十几起涉及商业航空公司的成功劫机案。在平静了一段时间之后，50年代末又上演了“带我去古巴”的劫机事件，使空中海盗这一罪行风靡世界，并在1969年达到极点。1969年，发生了多达70起成功的劫机事件和19起劫机未遂，是迄今为止劫机数量最大的年份。如今，劫机事件少多了，不仅是因为这种犯罪不再风行，而且由于第三世界国家的政府已经不那么容忍这样的行为，劫机者的避风港也已大幅减少。机场已经广泛加强安保，金属探测器、对手持和货舱行李的搜查和X光透视，以及个人行李箱识别都有助于提高安全性，不仅针对劫机事件，也针对炸弹威胁。当局也更有能力处置劫机者，而且这类罪犯的风险极高，通常会以被判监禁为结果。在极少的情况下，罪犯会被安全人员当场击毙。

各个航空公司和国家采取不同的态度打击空中恐怖主义。在美国，美国联邦航空局（federal aviation administration，FAA）禁止乘客在飞行过程中造访驾驶舱，而有些国家则鼓励机组对劫持者尝试进行抵抗。一些航空公司的驾驶舱舱门总是锁上的，并且航班上载有武装空警。但是在空中与恐怖分子对射，如果子弹打穿机身蒙皮，其结果可能是灾难性的。而有些航空公司对到驾驶舱参观，抱有更为放松的态度，他们相信，那些铁了心的装备有现代武器的恐怖分子可以很容易地武力制服手无寸铁的机组，而对乘客最安全的做法就是尽量不要反抗。事实上，劫机事件是极为罕见的，虽然有时很血腥暴力，导致飞机事故。过

去的经验表明，一旦被歹徒制服，维护安全最好的办法是机组遵守恐怖分子的指示。然而，无论在空中采取何种方法，机场严格的安全防范措施才是重点。

炸弹警报事件也偶有发生。航空公司接到通知，某个特定航班上被安放了爆炸装置。虽然情况被认真对待，但是通常都是恶作剧。当飞机在地面时，收到炸弹警告后可以迅速处理，因为机上的任何乘客都可以迅速撤离，并立即展开搜索。在空中，问题就不同了，飞机必须在最近的合适机场降落。途中备降后，在机场对飞机进行仔细搜索，并准备着陆后紧急疏散乘客。如果发现可疑的装置，坐在附近的乘客可以挪到其他地方，用毯子和坐垫覆盖着可疑炸弹并将其移动到合适的舱门。飞机须下降和释压，以减少爆炸发生后机身蒙皮被刺破的风险。如果爆炸物随后真的爆炸，覆盖物将会保护机舱内部，同时舱门会被炸飞，以保全飞机结构。

继续飞行

英航213在格林尼治时间14点28分飞越51N　40W，并继续飞向下一个航路点：49N　50W。温度表显示的是–52℃，风速40节，真风向260度，地速度463海里。导航检查确认位置、下一个航路点以及航迹。飞行计划更新到预计的50W，位置报在频率11 336kHz发送到甘德。

副驾驶R/T：甘德，英航213，频率11 336位置报。

甘德R/T：英航213，甘德，请讲。

副驾驶R/T：英航213，51N　40W，时间14时28分，高度370，预计49N 50W，时间15时25分，下一点Vixun。

（甘德复送信息指导英航在50W联系频率122.37MHz。）

副驾驶R/T：英航213收到，甘德50W联系122.37。

在飞行过程中，机组人员一般在乘客用餐后一段时间用餐。食物是盛在托盘里放在大腿上食用的。此外，在巡航过程中，一些航空公司允许机长自主决定接受乘客到驾驶舱看看，偶尔还会邀请乘客参观。如前所述，美国的飞机不允许，因为美国联邦航空局规定禁止这样的访问。驾驶舱给人的第一印象是比预期的要大，只能听到轻微的背景空气声音。大多数人还认为在驾驶舱里明显缺乏速度感，下方远远的云层似乎相对静止。波音777和其他现代化的飞机上的精密飞行仪表将引领未来10年，而且人们仍在持续研究改进未来的驾驶舱。例如在战斗机上常见的平视显示器正在开发用于商业用途。使用平视显示器，飞行员可以在着陆时将头部保持向外正常观察位，而主飞行仪表的信息将会显示在平视显示器上，这在不利的天气条件下特别有用。阿拉斯加航空公司已经在3类A盲降上使用平视（着陆时水平200米和垂直为零的能见度，和起飞时90米能见度）。平视显示器可显示下滑台和跑道中心线指引，当飞机穿出云层时，显示器上的跑道与实际跑道合并。

在地面上，一些机场安装了微波着陆系统，并将最终取代仪表着陆系统的无线电信号。微波着陆系统不受干扰，并允许采取曲线进近着陆。引进差分GPS后，也有可能使用GPS仪表进近。譬如波音777和空中客车A320这样的飞机现在采用被称为“电传操作系统”的飞行控制系统。通过来自电脑的电子信号操作飞机，飞行员的飞行操控和控制舵面之间没有了机械连接。当一个飞行员通过改变操纵杆位置来改变飞行状态时，操纵面的运动是由计算机来确定的。这样的系统可以通过编程防止飞行员的操作命令危及飞行安全运行。波音777推力杆操作是“电传驱动动力”的，无机械连接。飞行员操纵控制的改变也已经实现，空客A320飞机在飞行员一侧安装了一个小型的飞行操纵侧杆，取代了标准的驾驶杆。这个小杆12厘米长，可以用一只手操作飞机。去除了传统的驾驶杆，扩大了飞行仪表的视野。飞机将继续在未来10年内越造越大，在未来几年空客A380计划进入，这是一种550～600座的飞机。但是，就目前而言，下一代1 000座的飞机仍是后话。

国际航班的航线、时间表和票价结构，通过政府间的机构双边协商解决，如英国民用航空局（civil aviation authority，CAA）和美国联邦航空局。航空公司在一定的收费水平上运营服务的申请在政府间协商批准。在某些航线上的服务是共同运营的，每个国家的航空公司经营同等数量的航班，获得的收入两者平分。也有一些国际航空机构，例如国际民航组织和国际航空运输协会（international air transport association，IATA）。国际民航组织是联合国的一个由各国政府代表组成的机构，负责制定与设备、维护、飞行程序和安全等有关的技术标准，虽然大多数国家遵守国际民航组织的标准，但是明显的例外是美国和中国，他们各自设置自己的标准，与国际民航组织并不一致。

1944年，由52个国家签署的《芝加哥公约》[12]确认了国际航空运营商的权利，确立了有关空域的5项自由权利。自由权利一规定了从一个国家上空飞越的权利，自由权利二规定了只做加油和维修在一个国家做技术停留的权利。一直到第五项权利，现在还有第六项自由权，例如允许国际航空公司在另外两国之间承运付费乘客，例如美国航空公司运行纽约至伦敦至布鲁塞尔航线，协商的权利使得乘客可以在伦敦登机然后在布鲁塞尔下飞机。国际航空运输协会是一个由航空公司成员代表组成的贸易联盟，设置如客运设施、飞行服务、座椅（包括座椅间距）、配餐（包括食物构成）、免费行李额等有关商业标准，甚至还包括“免费物品”，如饮料或礼物。成员须遵守国际航空运输协会的建议。许多航空公司发现不加入国际航空运输协会是个优势，但多数大型航空运营商选择保持成员身份。

现在时间是15点30分，英航213 距纽芬兰海岸100海里，37 000英尺平飞。上一次位置报是在49N 50W发给甘德，预计到航路点Vixun15点45分。英航213收到指令接近Vixun时在甚高频133.9MHz联系甘德。在驾驶舱内，机组已经用餐完毕，正在准备下一段航程的航图，与此同时，客舱里餐后放映的电影快要结束了，一些乘客正在四处走动伸展腿脚。15点10分，在高频频率10 051kHz收到的纽约高频飞行气象广播显

示，预计波士顿低云有雨。在西大西洋上空37　000英尺，当前风向270度，风速30节，外界大气温度零下54度。地速450节。

机长R/T：甘德，英航213，重型机，飞行度370。

甘德R/T：英航213，下午好，应答机5624（在应答机上选择5624）。

甘德R/T：英航213，雷达识别了，可以直飞 Tusky 至波士顿，保持高度370。

甘德已经许可波音777沿直飞航迹飞往Tusky，距离约700海里。飞机通信寻址与报告系统收到最新的波士顿天气预报并且打印出来：多云900英尺，满天云2　200英尺，能见度3英里，有雨，有雾，温度5℃，露点4℃，风向290°，风速13节。在纽芬兰上空，还要飞行约两个半小时，机长向乘客广播，报告最新位置，并告诉他们，到达时间估计仍按计划在当地时间下午1点20分左右。波士顿的天气与预期大体一致。英航213按要求在频率134.9MHz联系甘德。

副驾驶R/T：甘德，英航213，下午好，飞行高度370，请求高度390。

（随后不久，英航213收到指令爬升至高度390。）

30分钟后，飞越圣劳伦斯湾，又接到指令，从当前位置直飞至位于波士顿东北部37海里的Scupp，直线距离超过500海里。在飞行管理计算机“航段”页面的顶部选择Scupp，执行此动作，飞机就会稍稍转向直接飞大圆航迹以节省时间和燃油。航路信标台仍然会随着飞行进程自动调整来更新位置，尽管该机的飞行管理计算机仍然由GPS随时更新位置。出于燃料检查目的，可以在飞行管理计算机选择正切页面，输入原航路的航路点。现在英航213在蒙克顿区调管制下飞行，频率132.2MHz，飞过新斯科舍，正切经过哈利法克斯，管制移交到蒙克顿，频率128.37MHz。

在17点04分，正切雅茅斯（Yarmouth），飞机离美国边境只有5分钟了，航空管制移交到波士顿128.05　MHz。波士顿区调指示英航213设置应答机2　333，并确认了在飞行高度层390直飞Scupp的航线。航路上波士顿的频率很安静，因为在美国不要求位置报告，无线电通话不多。甚高频现在调谐到波士顿通播频率 135.0MHz。

纽约和蒙特利尔的天气情报是从飞机通信寻址与报告系统得到的。纽约低云有雨，但蒙特利尔天气仍然良好，且远高于最低气象标准，如果机组要改航备降的话完全没有问题。这架飞机预计降落在波士顿时还有约8.5吨的燃油。从波士顿到蒙特利尔改航备降的燃油需要4.5吨，以及2.7吨的额外储备。由于波士顿才刚过中午，不是航班频繁时间，所以预计不会等待造成延误。波士顿机场的通播也是通过飞机通信寻址与报告系统获得的，收到通播“B”并打印出来：风300/12，疏云400，多云900，满天云1　700，能见度3英里，有雨，温度5℃，露点4℃，高度表拨正值29.50英寸，着陆跑道27和04左，起飞跑道04右。早些通过飞机

通信寻址与报告系统获取通播是有益的，而不必等到无线电范围200海里以内再从甚高频上抄收，这给机组提早准备着陆跑道的时间。以相对轻松心态研究进近航图并在飞行管理计算机上输入预计使用跑道的详细信息，这次是跑道27。

飞机正切缅因州的班戈，高度还在390，开始准备下降、进近和着陆。今天的标准终端进场航路是Scupp2，通常从北直接飞往Scupp，在11 000英尺由雷达引导离开Scupp，朝27号跑道进近，速度为230节（见图11—10）。在Scupp的等待或分高度层等待是椭圆形右航线，从波士顿甚高频全向信标 082度径向线入航，即262°M航迹方向。当不得不接受等待时，飞机不能像停在红灯前的车辆一样停在空中，它别无选择，只能沿着精确的航线，围绕着一个点绕圈飞行，而不是到处任意转圈。

现在英航 213是在波士顿200 海里以内，并且从甚高频广播里确认了通播“B”。两个在使用中的着陆跑道为27和04左，但是，由于噪音的影响，波士顿机场更喜欢使用27号跑道，因为进近完全是在水面上空进行的。但是，27号跑道只有7 000英尺（2 133米），是机场最短的跑道，并不是飞行员的最优选择。27号跑道晚上没有进近灯光，如果在盲降系统上飞行员精神不集中，在完全漆黑的水面上空进近会造成视觉上的错觉。跑道33号左长 10 000英尺（3 073米），是最合适的，也要从水上进近，但却或多或少穿越了其他所有跑道的中间点，使管制员难以对起飞的飞机调序而造成延误。然而，今天的环境是白天降落，飞机比较轻而且波音777有一流的碳刹车系统，27号跑道应该不是问题。

在距离下降起点约100海里时，机长进行下降简述。内容之一是下降时在过渡高度层将高度表拨正值从标准海压改为当地修正气压值。在美国，过渡高度层总是飞行高度层180，而过渡高度总是18 000英尺。

过渡高度（爬升时）和过渡高度层（下降时）各地区和各国之间各有不同，但通常高于在该地区的最高地形。在美国，18 000英尺在所有地形高度之上，除了阿拉斯加的麦金利山[13]，其高度超过20 000英尺。在高度表选择了当地修正气压设定值，仪表显示的就是飞机在平均海平面以上的高度。航图上标注的地形高度也是高于平均海平面的高度，通过交叉检查航图上的标高和正确设置本地修正气压后的高度表，飞行员可以在这一高度驾驶飞机，安全飞越过高地。

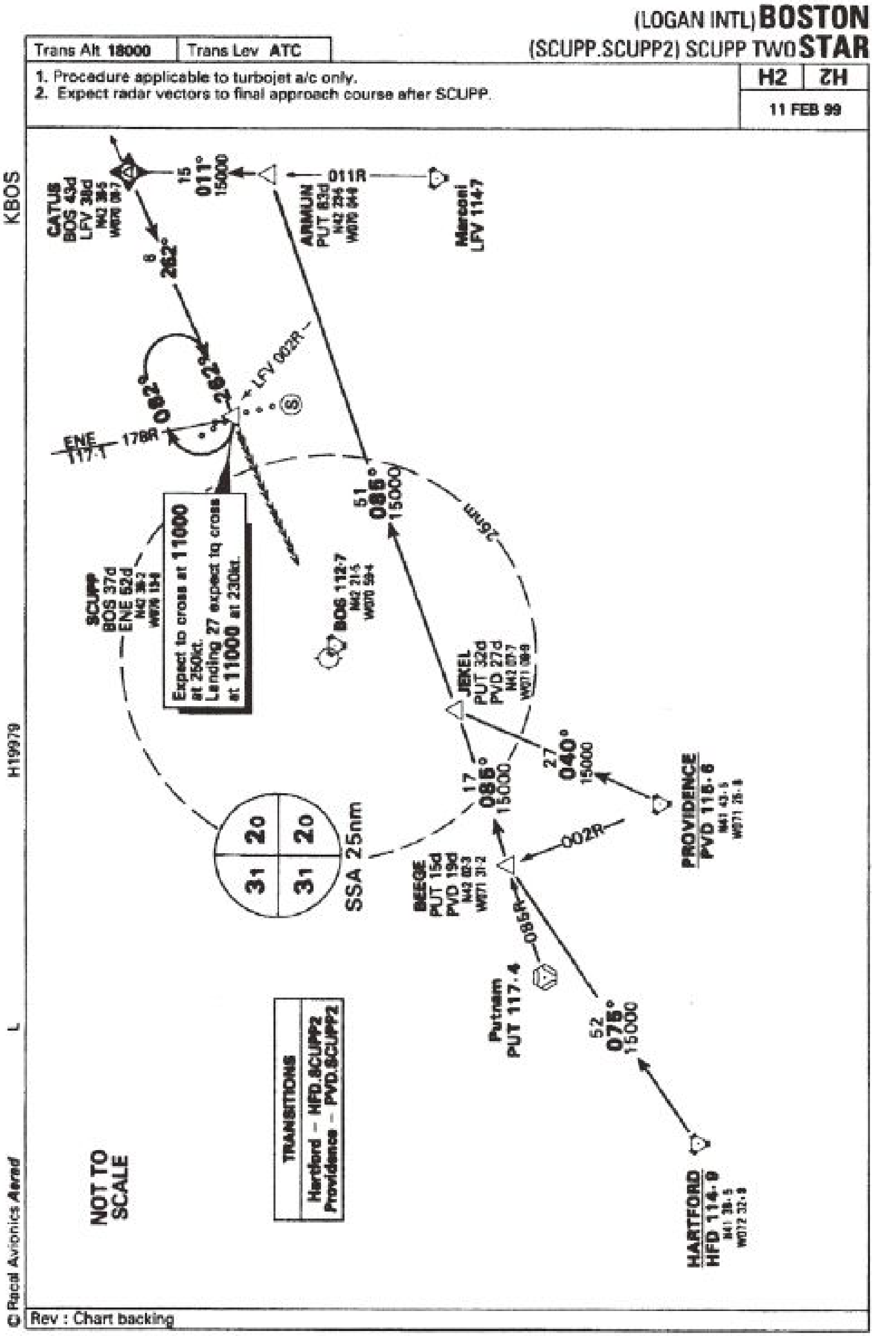
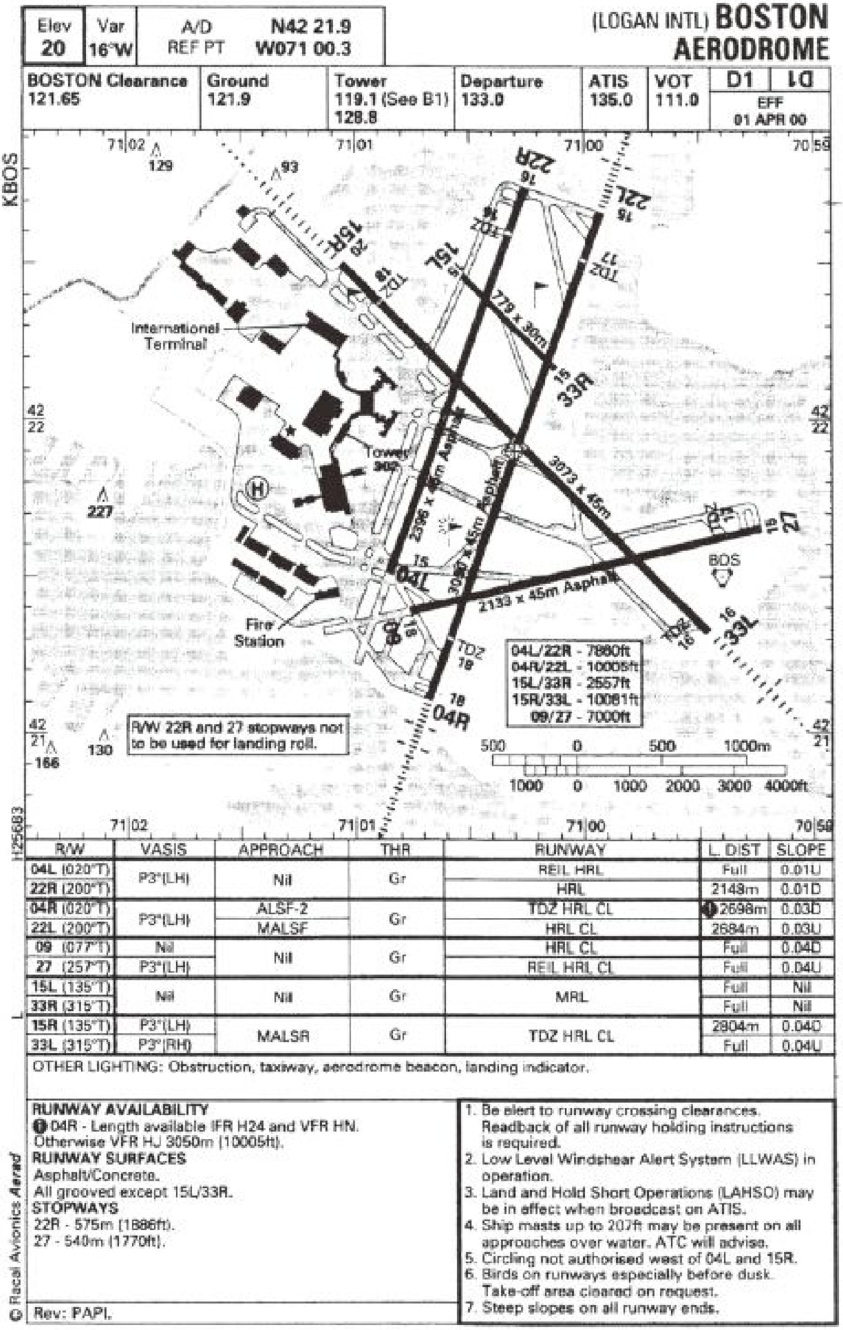


图11—10 波士顿进场航路（感谢AERAD提供）

然而，在一些机场，在附近多山的地形着陆时飞机可能得绕飞障碍进近，在极少数情况下，确实会发生导航错误或高度表拨正错误（见图11—11）。 1974年，一种称之为“近地警告系统”的引入，使此类事件明显减少。近地警告系统使用无线电高度表指示，检测近地率，并基于

起落架和襟翼是否伸展，采用不同的模式。虽然是一个好系统，但近地警告系统也有其局限性。无线电高度表只在距地面2　500英尺的范围内工作，所以，如果飞机下降率太大，例如每分钟4 000英尺（这个速度使用减速板很容易达到），警告只会在接触地面37秒前发出。此外，因为无线电高度表仅向下发送信号，所以无法检测到垂直的峭壁。该系统的第三个限制是，当起落架和襟翼放下时，近地警告系统不会给出任何警告，因为它假定飞机即将在机场降落。为了克服这些问题，遂引入了改进的系统，称之为增强型近地警告系统。

增强型近地警告系统可能是几十年来提供给飞行员的最大的安全援助。改进的系统补充了近地警告系统不足，同时克服了其局限性。此外，增强型近地警告系统提供了两个新的主要功能：前瞻地形警告和地形显示，以及着陆构型时的警告。增强型近地警告系统采用独立的数据库，包含了世界各地的机场和地形的详细状况。该数据库与飞机的GPS位置、高度和飞行航迹连同使用，来确定潜在的地形冲突。机场数据库包括所有3　500英尺（1　067米）或更长的铺设跑道，地形数据库包含了世界上95%以上的陆地表面。在运行中，使用两个报警级别，在遇到潜在的地形冲突之前40～60秒提示“警戒”，在20～30秒发出“警告”。这种潜在地形冲突的提醒和警告为飞行员提供了足够的时间在飞机接地之前采取行动，地形显示可以手动选择在导航显示器上显示，如果出现警戒或警告提示，会自动显示。在地势高的地区，在导航显示器上手动选择的地形监测显示会在发出任何音响警报之前，提供几分钟的潜在地形冲突显示。如果选择地形显示时也在使用天气雷达，在该导航显示器上的天气雷达会自动选择取消。如果天气雷达是必需的，则在另一导航显示器上选择显示。



R/W	VASIS	APPROACH	THR	RUNWAY	L. DIST	SLOPE
04L (020°T)	P3°(LH)	Nil	Gr	REIL HRL	Full	0.01U
22R (200°T)				HRL	2148m	0.01D
04R (020°T)	P3°(LH)	ALSF-2	Gr	TDZ HRL CL	❶ 2698m	0.03D
22L (200°T)		MALSF		HRL CL	2684m	0.03U
09 (077°T)	Nil	Nil	Gr	HRL CL	Full	0.04D
27 (257°T)	P3°(LH)			REIL HRL CL	Full	0.04U
15L (135°T)	Nil	Nil	Gr	MRL	Full	Nil
33R (315°T)					Full	Nil
15R (135°T)	P3°(LH)	MALSR	Gr	TDZ HRL CL	2804m	0.04D
33L (315°T)	P3°(RH)				Full	0.04U

OTHER LIGHTING: Obstruction, taxiway, aerodrome beacon, landing indicator.

RUNWAY AVAILABILITY
❶ 04R - Length available IFR H24 and VFR HN. Otherwise VFR HJ 3050m (10005ft).
RUNWAY SURFACES
Asphalt/Concrete.
All grooved except 15L/33R.
STOPWAYS
22R - 575m (1886ft).
27 - 540m (1770ft).

Rev: PAPI.

1. Be alert to runway crossing clearances. Readback of all runway holding instructions is required.
2. Low Level Windshear Alert System (LLWAS) in operation.
3. Land and Hold Short Operations (LAHSO) may be in effect when broadcast on ATIS.
4. Ship masts up to 207ft may be present on all approaches over water. ATC will advise.
5. Circling not authorised west of 04L and 15R.
6. Birds on runways especially before dusk. Take-off area cleared on request.
7. Steep slopes on all runway ends.

© Racal Avionics Aerad

图11—11 波士顿洛根国际机场平面图（感谢AERAD提供）

导航显示器上的地形显示与航路信息共同显示，用红色、黄色和绿色的彩色图案描绘相对于飞机目前高度的地形高度。红色图形，用于显示高于飞机高度2　　000英尺以上的较高地势。如果在飞机航路前方绘

出，那就是一个潜在的威胁。如果在飞机航路前方有琥珀色的图形也预示着潜在的威胁，表明地形从低于飞机高度500英尺延伸到高于飞机2 000英尺的任何地方。绿色图形表示飞机目前的高度在地形之上500英尺或更高，表示高度足够。飞机以下超过2 000英尺的地形没有显示，以减少显示屏杂乱。

机长现在开始进近和着陆简述。虽然两名飞行员已经研究过着陆航图，机长还要通过简述确认正确的细节信息已检查，也已考虑了所有相关细节。机长检查了影响波士顿和备降机场蒙特利尔的航行通告，确认没有什么重要变化，并确认来自通播的高度表拨正值是29.50 英寸汞柱.使用遮光板面板上的电子飞行仪表系统面板进行预设，然后29.50就会出现在主飞行显示器上的“STD”（标准）显示下方。在过渡高度层上按下电子飞行仪表系统上一个按钮，STD设置更改为29.50。飞行计划指出下降的最低安全高度是3 000英尺。波士顿机场25海里以内的扇区安全高度（sector safe altitude，SSA）进近航图上有标注：向东是2 100英尺，影响进近；向西是3 100英尺，影响复飞。

天气和进近是下一个考虑的因素。由于波士顿的天气不是很好，机长简述了使用自动驾驶进近，即飞机自动驾驶操纵沿仪表着陆系统下降至着陆限制高度，然后解除自动驾驶，人工操纵飞机着陆。

最低出云高度即着陆限制，称之为决断高度，在今天这种情况下，是高度表上的460英尺（跑道标高17英尺，因此是地面以上443英尺），而可接受的最低能见度为1.5法定英里。如果27号跑道有进近灯光，最低标准将会降低。在看不到跑道的情况下可以自动进近下降至气压高度表460英尺（无线电高度表443英尺）的决断高度，在此高度，如果看不到进近灯光，或者，对于英航213这里是指不能看见跑道，就必须开始复飞。如果在决断高度可目视地面，就可以手动完成进近和着陆。进近图上仪表着陆系统频率和最终进近方向有标示。最后进近点标示高度在6.4，仪表着陆系统测距仪处为1 670英尺（见图11—12）。最后进近点意味着，如果天气恶化中断进近，可以在此检查下滑台高度。

机组还讨论了复飞时飞行员的动作以及设定航路和高度，记下在改航到蒙特利尔之前，可用的剩余燃油以及等待时间。确认襟翼设定为30°，以今天187吨的着陆重量，在飞行管理计算机上选定参考着陆速度131节。作为输入确认，基准速度Vref的数字读数现在显示在速度条的底部。因为跑道很短而且湿滑，机长决定使用更高的自动刹车4设置。计划首选的脱离道和到达预计航站楼停机位的滑行路线，经15号右跑道入口到达7A号门。重新检查一遍以确保所有的都检查到，当副驾驶没有什么要补充的，着陆简述完成。

英国航空公司的标准运行程序中的所有进近被称为“监视进近”。尽管，在这次飞行中，机长是操作飞机的飞行员，由他完成起飞和降落，但飞机进近是由副驾驶来完成的。一般在下降起点之前，机长将飞机控制交给副驾驶，副驾驶操作飞行下降到决断高度。自此机长的职责是监视副驾驶的表现，并承担副驾驶的操作，以及进行无线电通话。

在决断高度（有些条件下，在此之前）建立目视基准之后，机长从副驾驶手中接过飞机控制并着陆。这样的程序给机长留下更多的自主时间监控更困难环境中飞行的进程。如果由于看不见跑道在决断高度或之前实施复飞，副驾驶将会驾驶飞机，而他的行动，将再次受到机长监控。简述完成后，机长现在接过无线电通话，并正式把飞机的控制权移交给副驾驶。

由副驾驶监听在甚高频左管制（空中交通管制）频率时，机长在甚高频右联系公司并且告知预达时间，确认地面勤务安排正常，并收到航站楼7A号门的确认。再次检查通播无任何变化，当前仍然是通播“B”。

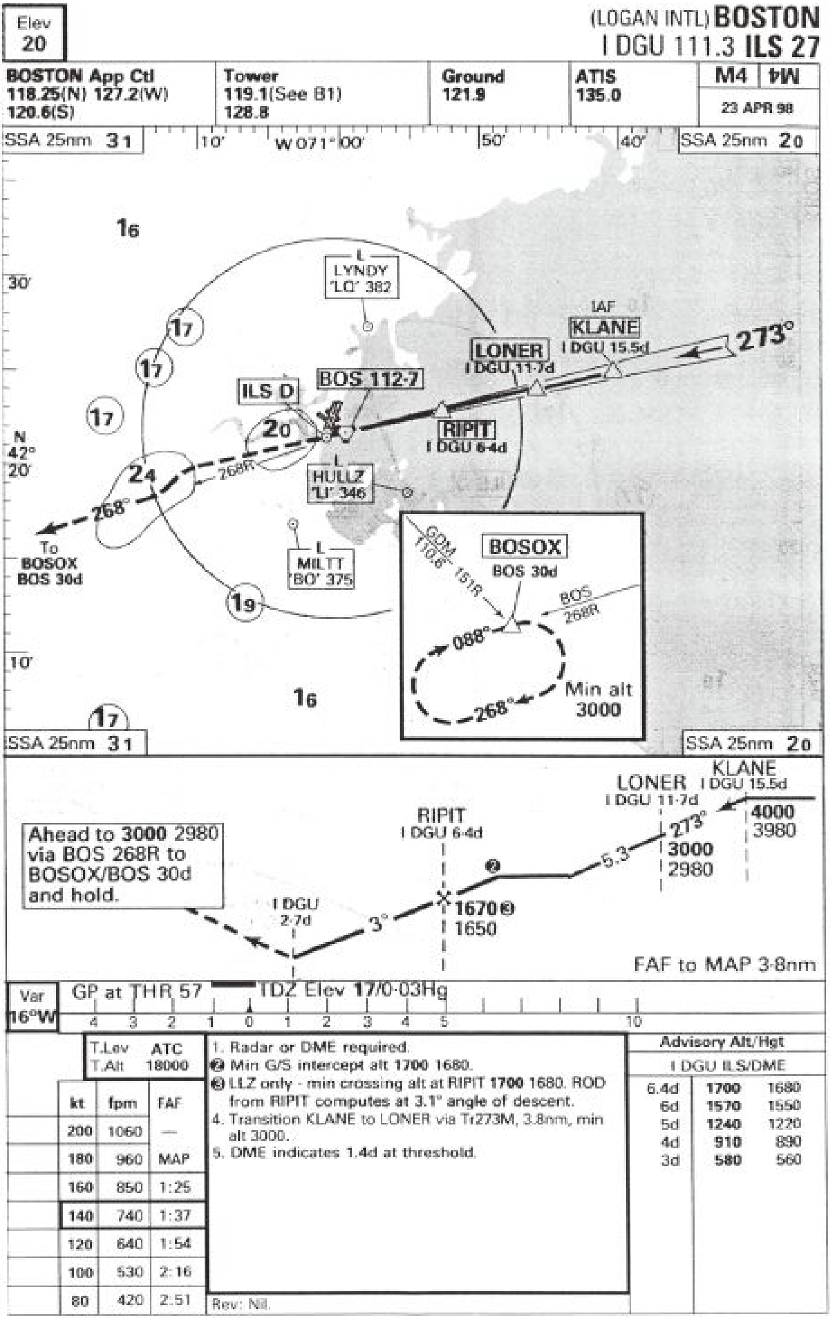


图11—12 波士顿27号跑道盲降进近图（感谢AERAD提供）

现在机长调出下降检查单并边读边做。按下重现按钮，检查上部发动机指示与机组警告系统屏幕上的任何故障以进行分析。什么都没有显示，检查单上也没有“注释”（提醒以前的非正常检查表中存储的项目）。继续电子检查单，证实机长的简令完成，参考速度为131海里，

高度表上的决断高度和自动刹车都确认已经设置。无需提示，每个飞行员会检查肩带是否系好。

现在机长向乘客播报最新预计到达的时间和波士顿的天气情况，当简述都结束时，波士顿区调呼叫并发布下降许可。

波士顿R/T：英航213重型机，飞行员自主决定下降高度到240。

机长R/T：英航213，下降高度240，自主决定。

副驾驶在高度窗拨24 000英尺。在距目的地150海里时，或离下降顶点50 海里时，不管哪个近些，所选择跑道的盲降（仪表着陆系统）被自动调谐。下降点和下降速度由飞行管理计算机计算，在高度窗中选择要求高度240，由飞行管理计算机自动控制开始下降，并提供最经济的下降路径。在下降时，导航显示器上一个绿色的弧线表示在此位置将达到选择的高度。作为粗略的指导，波音777所需下降的距离可以通过乘以3.5（其他大多数飞机乘以3.0）得出。要下降英尺数的千位以下数字去掉，这里是15，答案大约是53海里。这个“心算”距离，由于平均15节的逆风向量作出了调整，足够准确地检查飞行管理计算机的计算。尽管飞行管理计算机已然计算出最佳下降点，不过，美国的空中交通管制出了名的喜欢让飞机早些下降，考虑到离场飞机的原因，且机组在理想的下降点之前已做好下降准备。

下降和等待

在要求的下降起点，飞行管理计算机开始执行下降。随着机头下沉，推力杆自动到慢车位，飞机实际上是以最小的功率下降。此时在备用高度表上选择波士顿地区气压。

机长R/T：波士顿，英航213 重型机，高度390，下降高度240。

下降穿越29 000英尺，外界大气温度–42℃。波音777进入云层，由于大气不稳定，出现了轻微的颠簸。积冰探测器感应到积冰状况，发动机防冰装置自动开启。两台发动机防冰指示在上部发动机指示与机组警告系统上靠近N1仪表处，显示为绿色。发动机自动增加功率至高慢车，以提供足够动力防冰。

增加的推力减缓了下降率，要求更长的距离来降低高度。作为预先计划，可以在飞行管理计算机内输入飞行员预计发动机防冰所需的高度，飞行管理计算机就会据此提前下降起点。如果没有预计到长时间的积冰条件，可能需要使用减速板加快下降以达到下降高度。飞机的速度由飞行管理计算机控制，初始速度是0.83马赫。随着波音777下降，大气密度越来越大，空速指示器就成为主要的速度指示。空速在310节左右。预计下降率大约为每分钟2 000英尺，如果防冰装置关闭或为2 300

英尺。

当英航213接近飞行高度240时，　　频率移交给波士顿区调频率134.95。因为无线电通话数量显著增加，此时通话节奏加快。英航213被进一步许可下降至17　000英尺，高度表设置为29.50英寸汞柱。如前所述，美国的过渡高度层都是飞行高度180，因为已经许可下降至此高度以下，所以可以按下气压高度表选择钮，检查高度表设置是否为29.50。

副驾驶喊话："设置修正海压，进近检查单。"检查单由机长负责读出。交叉检查高度表设置修正海压29.50，通过确保导航显示器上的GPS显示来检查航图的完整性。高度表现在显示的是波士顿地区平均海平面上的飞机高度。穿过20　000英尺时，机长喊出此高度，副驾驶也应以确认。收到了进一步的许可下降到12　000英尺。空管给英航213下指令减速到250节并联系波士顿进近118.25。通常情况下在10　000英尺以下，250节是最大可允许的速度，但由于交通拥堵，要求飞机提前减速。在美国，速度控制常被作为调节进场时间的手段，而很少采用等待的方式，除非天气条件恶劣或者由于除雪使机场关闭。通常会指挥飞机加速或减速一定距离，在有些情况下甚至到几百英里外。



1 INCH = 7.5 NAUTICAL MILES
ATLANTIC OCEA



图11—13 波士顿区域图（由杰普逊提供）

在高度窗口中确认选择12 000英尺。不管之前如何指挥的，波士顿进近管制通知英航213预计有个短暂的等待延误，所以英航213检查了Scupp等待程序（向台航迹262度/右航线）并在飞行管理计算机中启动该程序。不久之后确认在Scupp等待，并且要求英航213在Scupp 高度12 000英尺等待。波音777飞机在12 000英尺改平，距离Scupp只有15海里。副驾驶通过按压指示空速/马赫基准电门和回调速度来进行“速度干预”，飞机开始减速。

尽管最初命令英航213在12 000英尺改平时减速到250节，在美国，飞行高度在14 000英尺以下的飞机等待的最大速度为230节。美国规定的最大等待速度为：6 000英尺以下，200节；6 000至14 000英尺，230节；14 000 英尺以上，265节。国际民航组织规定的最大等待速度为：14 000英尺以下，230节；14 000至20 000英尺，240节；20 000英尺以上，265节。尽管也经常允许飞机光洁形态飞行，比如不放下襟翼，国际民航组织规定最大等待速度的目的在于使飞机保持在等待区内。然而按照英航213的重量，速度带上的无襟翼最小速度为211节（Vref131 +80），该速度也几乎是最经济的等待速度，所以副驾驶拨

回空速表游标使飞机减速到211节。飞机已经减速到250节，但是由于波音777飞机极好的空气动力学设计，当水平飞行时，在油门完全收回的状态下，从310节的下降速度减小到211节的等待速度，减少这100节的速度只需要大约10海里的距离。

英航213在高度12 000英尺以211节的速度通过Scupp，飞机自动转弯切入等待航线的出航边082度磁航向。在等待航线中，每个180度转弯的时间为1分半，经过对风的修正每条边的飞行时间为1分钟，所以等待航线的时间为大约6分钟。在Scupp进入等待航线很容易，因为英航213直接右转进入出航边，但是从其他方向进入等待航线需要采用其他进入程序。在有些情况下，飞机可能会突然被告知在某点等待，这时，在没有飞行管理计算机的帮助下需要立即思考来检查等待程序、飞机位于等待航线的哪一区，以及进入的程序（在训练中，所有学生都会时不时作出错误的转弯）。在没有飞行管理计算机的情况下，飞行员为了修正出航边上侧风带来的偏航，采用的偏流角必须是正常情况的2倍。然而，飞行管理计算机可以通过改变转弯坡度来实现非常精确的等待程序。在伦敦最近的记录中，在高度8 000英尺，风速大于100节时，即便是飞行管理计算机，通过修正来保持等待程序也有困难。

机长R/T：英航213重型机，在Scupp 进入等待航线，时间1731，高度12 000英尺。

波士顿进近R/T：英航213保持12 000英尺，结束等待航线，离开Scupp， 航向260，速度230节。

机长重复了这个许可，然后进行旅客广播，“乘务组15分钟后落地”。在1分钟出航边快结束时，飞机右转飞向Scupp，然后调整航向进入入航边。波音777脱离等待，在飞行管理计算机中输入 “离开等待”。副驾驶在航向窗口中预设航向260，当波音777通过Scupp时，按压了航向选择按钮，之后飞机转弯至航向260，副驾驶增加速度到230节。

波士顿进近R/T：英航213重型机，重新许可高度9 000英尺，在 9 000英尺改平时，速度210节。

英航213执行了修改指令，离开12 000英尺，保持速度230节。下降通过10 300英尺时 “系上安全带”信号灯自动亮起，于是乘务组开始准备落地。在10 000英尺，机长喊话报出高度和 “1 000英尺到改平”，同时打开外侧的着陆灯作为“看见和被见”提示。英航213现在在9 000英尺改平，速度再次减小到最低的光洁形态速度211节，离管制员要求的速度210节只差1节，这是很令人满意的。波士顿的当地时间为下午12点40分，所以还是白天，但是由于有大量云层覆盖，仍然不能看见地面。现在英航213处于雷达管制，可以联系进近频率132.4MHz。

进近和落地

如今雷达引导下的进近几乎完全由来自地面的管制员给飞机发布航

向、高度和速度指令来控制。在现代的雷达管制中心，管制员的雷达屏幕上可显示飞机的航迹和高度，但不能显示航向、空速、爬升和下降率，当需要这些时，可向飞行员询问。在所有雷达管制下，飞机以S形（甚至）或者提前减速，以适当的间隔按次序转入五边。雷达航向最终把飞机引导到与跑道中线延长线（距离跑道入口10海里处）成大约30～40度夹角的地方，在飞行员自动或人工控制下，飞机截获盲降并完成最后进近阶段。

在不那么繁忙的机场没有雷达管制，因此仍然需要下降许可，但是下降、进近和落地程序，包括高度和速度都是由机组计划和控制的。在这种情况下，管制员许可通常包括以一定的高度，比如4 000英尺，下降通过机场的一个信标台。当完成相应的检查后，飞行员自行决定以正确的高度和速度完成管制员指令，准备好进近。在天气不好的情况下，应该进行完整的仪表程序，这通常包括背台的飞行和下降到一定的高度。这是通过向落地跑道相反的方向飞离机场，完成一个程序转弯飞回机场，然后沿着跑道中线向台飞行，完成最后进近下降并着陆。飞机上有仪表进近航图，显示程序、计划的下降剖面和标高，很多相关的细节都有标注。

在雷达完全覆盖的机场，航图上面的完整的飞行程序在设备故障情况时仍然可以使用。通过调整航向修正偏流来飞出精确的航迹，使用秒表对航段和转弯计时，飞行的速度、高度和下降剖面都必须精确。在天气不好的情况下，云中飞行需要高度集中注意力。如果具有盲降设备，并且跑道中线和下滑台可以引导飞机到接地点，那么可以通过仪表上的指引系统人工操纵飞机飞行，或者通过自动驾驶仪使飞机沿盲降的无线电波束飞行，完成人工或自动着陆。在不利天气下，某些机场精密雷达监控一些盲降进近，并警告飞行员可能明显偏离盲降。甚高频全向信标和无方向性信标进近仅用于穿云程序，但仍然可以使用自动驾驶仪飞到决断高度，在最后进近阶段建立目视参考。与盲降进近相比，甚高频全向信标进近精度较低，并需要更高的云底高限制，无方向性信标进近在三者中的限制更高，精度最低。

在天气好的情况下，向一个没有雷达且飞机活动不多的机场进近时，机长可以请求目视进近着陆，这包括向机窗外部观察（就像轻型飞机），定位飞机相对于跑道的位置，同时按照仪表精确控制飞行高度、航向和速度。目视定位落地可以省时间并避免繁琐的程序，但是如果具有盲降或其他导航设施，当然也可以使用它们来引导最后进近。事实上，当飞机以目视定位进近时，必须通过可用设备来交叉检查飞机对准正确的跑道，尤其是在平行跑道的情况下，必须保证飞机在正确的跑道上落地。有些机场，比如在波斯湾的沙迦机场和迪拜机场，由于相隔很近，并且跑道方向相同，飞行员有时会在错误的机场落地。

在波音777上，即使没有任何无线电助航台，飞行管理计算机、水平导航和垂直导航都可显示任意跑道的导航和下降剖面，并提供有用的帮助。波音777具有额外的“航迹选择模式”和“飞行航迹角”，这可以用于通过GPS支持下的飞行管理计算机来引导飞机最后进近。要使用这种

设备，可以在航迹窗口中初始设定最后进近航迹，然后飞行员可以通过飞行管理计算机引导飞机沿跑道中线以3 000英尺的高度到达五边10海里处，接通航迹选择模式和飞行航迹角，向下调3度，然后飞机可以沿它的盲降剖面持续飞行并完成对风的修正。

目视进近的天气条件必须符合目视气象条件，规定飞行员必须能见地面，且能见度至少5海里，同时与云的水平和垂直间隔分别必须至少是1海里和1 000英尺。当天气条件低于目视气象条件时，应该运用仪表气象条件，飞行员必须依靠仪表直到在着陆点上的某一个高度看见跑道。在目视气象条件下，飞机必须按目视飞行规则飞行，这规定了飞行员应该自行保持飞机间的间隔而不受空中交通管制许可或指令的控制。在仪表气象条件下，在夜间或在管制空域内时，即使天气晴朗，飞机也必须按照仪表飞行规则飞行，并且一些具体的规则具有强制性。所有大型喷气式飞机主要在管制空域内运行，所以必须按照仪表飞行规则飞行，这规定了提交的空管飞行计划必须具有飞行的所有细节，必须遵守空管许可和指令，必须具有某些相应的无线电设备，并且飞行员必须具有相应的执照。

在所有飞机上的训练，从单发的螺旋桨飞机到大型喷气式飞机，飞行员必须练习一种叫“起落航线”的程序训练起飞和落地。起落航线是一个矩形的航线，包括迎风起飞、在一个安全高度与跑道成一定角度爬升转弯和在某个高度改平（大型喷气机一般为1 500英尺）。改平飞机转到三边平行于跑道飞行直到通过跑道入口，然后90度转弯，以一定的角度向跑道下降，最后转弯对准跑道中心线，继续下降落地。当在着陆滑跑中减速时，其实是为另一次起飞作好了快速准备，重新设置襟翼和起飞功率，飞机再次起飞。起落航线飞行包括所有基本的飞行程序，其中有起飞、爬升、转弯、平飞、下降、进近和落地。每次起落航线仅需要大约10分钟并且需要大量的工作负荷，但这些经验在目视进近着陆时判断进场高低十分有用。飞行员不需要飞越机场完成完整的起落航线，只需要在三边或四边目视定位飞机（可以是左航线或右航线，这取决于进近机场的方向），通过在起落航线训练中获得的经验来判断距离和高度，然后完成余下的起落航线。如果机场在正前方，飞行员可以对准跑道做直接进近。

如果目视飞行着陆，通常有一些无线电设备可以在最后进近时引导飞机，但是只有盲降系统可以显示下滑台。在没有无线电设施的情况下，如果可以清楚地看到跑道和进近灯，保持跑道中线方向并不困难。然而，判断正确的下降剖面相对而言难一些，因此设计了大量的助航设备进行目视引导。

目视进近坡度指示器，包括以一定合理距离分开的两个彩色灯排，在跑道接地点的一侧或两侧。当飞机高度过高时，两灯排都显示白色，当高度过低时，都显示红色，飞机位于下滑台上时一红一白。在远东、澳洲和新西兰使用的是T型灯光系统，当飞机过低时显示T型，过高时显示倒转的T型，如果只看到横排灯则说明飞机在下滑台上飞行。对于大型喷气式飞机，正确的显示是一个横排灯及两边各有一个向上白灯。另

外一种更加精确的目视进近助航设备叫精密进近航道指示灯（precision approach position indicator，PAPI），它由一组水平的4色彩灯组成，安装在接地点的其中一侧。当飞机在下滑台上时会显示两个红色灯和两个白色灯，如果显示的白色灯多于2个表示飞机过高，如果显示的红色灯多于2个表示飞机过低。

很多盲降跑道也安装有目视引导系统来检查盲降系统的下滑台，或者当设备由于维修、更换或失效时在目视进近中使用。当没有安装这些目视助航设备，或者在没有盲降系统的情况下使用甚高频全向信标或者无方向性信标在云中进近时，只要在开始进近前检查了地图位置的完整性，就可以使用飞机地图显示器中的航迹信息作为引导。如果在跑道航路点输入了跑道标高，在导航显示器上的垂直导航航道显示器可以提供引导，但是低于扇区安全高度时不能在云中使用。当没有下滑台引导时，可以通过心算来帮助导航。盲降系统和目视进近系统通常显示下滑台与水平线的夹角是3度，也就是说，飞机在最后进近中每一海里下降300英尺。如果知道接地的距离，在进近任何一点所需的高度是乘300，即距离接地点5海里的时候高度是1 500英尺，3海里的时候是900英尺。在进行这种进近时，升降速度表也可以起作用，每分钟750~800英尺的下降率可以起到有效的下滑引导作用。在波音777上，可以在航迹角选择器上选择3度来精确完成进近。

当使用外指点标进近时，飞机以下降航图上公布的高度飞过信标台，比如1 600英尺。从外指点标到接地点的时间也公布在航图上，这个时间通过飞机的地速算出。如果给出的时间是2分钟，那么从信标台到一个海平面高度的跑道需要每分钟800英尺的下降率。在外指点标，秒表从跑道入口倒数，因此，还剩下1分钟时可以对进近航路做最后检查。如果还剩下1分钟时高度是750英尺，那么从短五边最后进近到接地点需要每分钟750英尺的下降率。然而在波音777上，如果在3度的下滑角，通过外指点标的高度是1 600英尺，那么可以按照之前描述的使用航迹选择和飞行航迹角，然后飞机可以再次执行它的盲降进近程序。

为了减少噪音、出于飞机排序的目的或进近中的地形问题，有时需要一些目视进近。在肯尼迪机场，很少在13左跑道使用盲降进近，因为飞机需要飞越纽约的曼哈顿岛和女王区，这会对9海里之外的拉瓜迪亚机场进近的飞机产生干扰。取而代之，向跑道直角进近，飞越肯尼迪机场西部的Canarsie 甚高频全向信标，然后作90度转弯切入跑道，起始进近距接地区3海里时保持高度1 000英尺以下。重型喷气式飞机的飞行员最好在至少800英尺时能够稳定地进近，在低高度靠近跑道时做大角度转弯并不容易，尤其是在侧风的情况下。然而在13左跑道，地面频闪灯和精密进近航道指示灯可以作为参照，还有一些其他的目视导航设施，包括距离跑道入口2海里的高架环渠和短五边上跑道中心延长线上的国际酒店的白色墙面。

目视进近，即使用眼睛和判断力而不是盲降系统，这在实际操作中是常用的，在大机场更是如此。有时仅仅是因为设备需要维修或者由于风的原因需要在很少使用的跑道上落地。在这种大型喷气机上仅仅通过

观察与跑道的角度来判断进近的高度和距离是非常困难的。然而在进行这种目视进近时，经常使用某种目视下滑台助航设备或者一些简单的计算方式。波音777飞机的精密性以及众多可用的导航数据使得原本困难的目视进近能够在波音777上更准确进行，也使得飞行员执行程序变得更加简单和安全。

最终着陆

英航213现在的航向是260，高度9 000英尺，速度211节，距离波士顿20海里，波士顿进近在频率127 .2MHz上对它进行雷达引导。飞行管理计算机已经自动调到了盲降系统的频率111.3MHz上，机长现在检查跑道27盲降系统识别码，进近航道已经显示。最初只有盲降系统的频率显示在主飞行显示器的左上方，但是当系统识别了盲降系统，频率消失，取而代之的是识别码。无方向性信标不能被自动调谐但是可以通过在飞行管理系统中输入该台的频率来选择。不过，无方向性信标也可以自动被识别，它们的识别码显示在导航显示器的下角。在波音777上，飞行员不再需要记得摩尔斯电码。

波士顿进近R/T：英航213重型机，由于间隔左转航向180，1点钟方向有飞机，从左向右飞行，高度未知。

机长R/T：英航213重型机，左转航向180，我们正在观察。

雷达管制的屏显上显示附近有很多轻型飞机，管制员把它们的位置通报给大型机。没有在雷达屏幕上提供高度数据的飞机很可能是一架低高度飞行的轻型飞机。无线电通信连续不断地进行，一个管制员同时指挥着多架飞机。

波士顿进近R/T：英航213重型机，下降到6 000英尺，波士顿高度表拨正值2 948。

机长R/T：英航213重型机，下6 000英尺，2 948。

波士顿进近R/T：英航213重型机，右转航向340，速度180，重新许可下降高度到4 000英尺。

机长R/T：收到，英航213重型机，航向340，速度180，下4 000英尺。

副驾驶请求襟翼1，并在指示空速窗口中把速度调到191节。通过按压飞行高度按钮开始执行下降，飞机用改变俯仰来保持下降或上升时选择的速度。襟翼1的最低速度是191节，所以当速度降低低于200节时，副驾驶请求襟翼5，并进一步将速度调到180节。

通过7 000英尺时飞机再次进云，探测到积冰后防冰系统自动打开。英航213在云中带着颠簸飞行，偶尔大雨打在风挡上面。驾驶舱客舱服务指示器亮，客舱报告已经准备好落地。

波士顿进近R/T：英航213重型机，左转航向310。

左转310，通过5 000英尺时喊话"还有1 000英尺"。在4 000英尺，自动驾驶仪截获了高度，此时英航213还在云中，并遇到了轻度颠簸。

波士顿进近R/T：英航213，现在下到2 000英尺，可以盲降进近跑道27左，在Ripit位置点前最低速度160，建立盲降时联系塔台119.1。（盲降航图底部的一个注释显示，在跑道入口的测距仪距离为1.4海里，而在Ripit的测距仪距离为6.4海里，距离落地其实只有5海里。）

距离接地点现在是12海里，飞机以适当的航向截获27跑道的盲降。副驾驶按航向台电门，航向台预位，速度降低到170节。主飞行显示器上的飞行方式信号牌以白色确认了航向台预位信号。当英航213在2 000英尺改平时，飞机距离接地点8海里，航向310，仍然不见地面。增加油门后速度稳定在170节。机组盯着屏幕，仔细监控自动飞行进程。当自动驾驶截获了盲降的航向台时，字母"LOC"在飞行方式信号牌上变为绿色。航向台指针由主飞行显示器右边的停止位转到了指向中间位置，然后飞机开始自动启动左转截获跑道中线。现在按压进近按钮，预位下滑台和两个自动驾驶，这可以让飞机在1 500英尺时自动接通所有自动驾驶仪。主飞行显示器上的飞行方式信号牌以白色确认了下滑台预位信号。当从下滑台下方截获时，很快会看到下滑台指标从显示屏的上方向下移。喊话"下滑台移动"。

副驾驶：起落架放下，襟翼20，着陆检查。

起落架选择放下，襟翼选择20度并检查放好。副驾驶减速到160节。作为电传飞行的飞机，波音777可自动补偿襟翼、起落架、减速板运动或油门变化带来的配平改变。机长开始做落地检查单，通过把减速板拉出卡位并向后拉1英寸（2.5厘米）来预位减速板，使其在接地时放出。白色的减速板预位信息显示在发动机指示与机组警告系统，巧合的是，客舱服务控制器的"客舱准备好"信息也同时显示在屏幕上。接着，机长读出落地检查单，核实所有的项目，除了着陆襟翼都已经完成。副驾驶在空速窗口中设置160节，然后油门自动收回。当下滑台截获时，字母"G/S"在飞行方式信号牌上变为绿色。当飞机自动驾驶在航向台和下滑台上飞行时，油门进一步收回。

机长R/T：英航213重型机，建立盲降跑道27。

波士顿塔台R/T：英航213重型机，继续进近，在Ripit联系我。

在通过Ripit时，通过比较高度表的高度和航图上的Ripit高度1 670英尺来检查是否在下滑台上。副驾驶请求襟翼30，并将速度调到136节（Vref +5）。落地检查单中的所有项目现在都变成绿色，检查单底部显示"检查单完成"。两个飞行员都证实着陆检查完成，并且在高度选择窗口中设定复飞高度3 000英尺。

机长R/T：英航213重型机，Ripit向台。

波士顿塔台R/T：英航213重型机，可以落地。跑道道面湿，刹车效应好。

当跑道道面被雨、雪或冰所污染时，刹车效应报告为：好、中、差。自动刹车的设定从1到4和最大自动值，这取决于当时的条件。当设定为4级时，英航213以136节的速度落地时需要4 800英尺停下来。27跑道的长度为7 000英尺。在大机场，大多数跑道的长度大约为10 000~12 000英尺，但是也有明显的例外，如跑道长度为15 000英尺的波斯湾的多哈机场和津巴布韦的哈拉雷机场。

在1 500英尺，3个自动驾驶都自动接通，在主飞行显示器上显示LAND3。通过无线电高度1 200英尺时，英航213在厚厚的云中以136节的速度飞行，距离接地点4海里。显示风速为320度，20节，飞机有些颠簸。飞机修正侧风的影响，在跑道中线上，航向279度，向右带6度偏流角。

在有些情况下，飞机在最后进近时可能由于许多原因要复飞。这可能是由于一架落地或起飞的飞机还没有很快离开跑道造成跑道被占用，容易造成后机追上前机，或者是因为能见度低于最低标准。根据情况，管制员可能要求飞机执行复飞程序，或者机长认为当时情况不好而复飞。操纵飞机的飞行员喊话“复飞，襟翼20”，然后按压在油门杆前面的起飞/复飞开关电门。飞机自动抬头保持所需速度，油门杆自动前移到设定合适的功率。[14]如果需要，可以第二次按压起飞/复飞开关电门设定全复飞功率。不操纵飞机的飞行员设置襟翼20，当建立了正上升率时收上起落架。进近航图上公布了仪表进近航线和复飞程序的高度，同时也包含在飞行管理计算机中。因此，可以接通水平导航跟随飞行指引仪来复飞。然而，在大机场，可用雷达管制重新引导飞机再来一次进近。

接近无线电高度1 000英尺时，副驾驶喊话“1 000英尺无线电高度”。机长检查了风的情况、高度窗口中的复飞高度3 000英尺、主飞行显示器的显示和着陆飞机构型。然后，作为驾驶飞机落地的飞行员，他喊话“人工落地460气压高度”（将人工操纵飞机落地，在气压高度表上选择460）。这时飞机出云，跑道在前方3海里清晰可见。有小雨。在下滑线上，飞机机头有5度偏流，跑道在稍稍偏左的前方。

通过500英尺，还有45秒钟着陆的时候，塔台发布的风向是320度，15节，有7节的逆风，向左修正4度偏流角。指示空速显示136节（通常在着陆参考速度上增加5节的余度，但是在使用自动油门时，对于逆风也不用增加进近速度），地速129节，航向277度，自动驾驶精确地按照盲降系统飞行。

在短五边，当飞机靠近地面时，有些风会造成风切变，这对飞行而言可能非常危险。风切变是风向风速的迅速改变，这会影响通过机翼的气流，可能会在毫无警告的情况下发生。在进近时，飞行员应该仔细监控偏流和风的情况，看是否有任何变化。波音777安装有风切变预警系

统，这可以在导航显示器上显示风切变的区域，并且可以在两条琥珀色的径向线之间以红色和黑色的弧来显示大概的几何尺寸（宽度和深度）。琥珀色或红色分别作为警戒或警告的“风切变”信息显示。由于雨和水滴的阻力会使机翼表面粗糙，大雨也可能造成危险。机场附近的雷暴可能造成严重的下降气流，被称为微下冲气流。在多数情况下，飞行员会推迟起飞或进近，直到雷暴消失。

飞行员在模拟机上有风切变改出的训练，如果出现空速、垂直速度、姿态、功率、下滑台偏移的大量增加或者风切变告警，飞行员将立即执行复飞。因此，稳定的进近非常重要，这样才能在比较早的阶段发现任何正常情况的改变。尾流对进近而言是另一个问题，在前机落地或起飞时会产生翼尖涡流。翼尖涡流是大的水平涡流，具有切向的速度，像波音747这样的大型机产生的翼尖涡流的速度可以高达90节。涡流的核心区域可以是25~50英尺宽，并从每个翼尖迅速向后扩展直到它们重合消散。一般会通过增加大型机和小型机之间的落地间隔时间来避免尾流的影响，但是对大型机而言它并不会产生那么大的影响。

当英航213通过510英尺时，副驾驶喊话“50英尺到决断”，在460英尺，喊出“决断”。当看见跑道时，机长回复“着陆”，然后断开自动驾驶，机长操纵飞机人工飞行。尽管飞机现在是人工飞行，但按照公司运行要求，自动油门保持接通状态，油门自动控制。机长的注意力从屏幕转移到了跑道判断进近的最后阶段，而副驾驶继续监控仪表。

波音777在相当稳定的航道上飞行，任何的偏差由副翼和升降舵修正。当然，方向舵脚蹬保持在中立位置，它仅仅在不对称飞行时或引导飞机沿跑道起飞和落地时使用。在进近的这个阶段，必须牢牢保持对飞机的控制。在自动油门接通的情况下，如果有阵风，需要大动作飞行操控和油门加减。然而，即使在稳定的情况下，也应该持续地对飞行控制和油门杆进行小的调整来修正风向风速的微小变化。在进近的最后阶段，机长不仅要监控跑道中线和下滑台的指示，同时也要监控姿态、速度、航向、高度、下降率、功率的设定和接地时间。所有这些都是扫视的一部分，眼球会不断地绕着各种仪表的屏幕运动。这个阶段的发动机功率要求是大约56%N1。发动机短舱吊在机翼下方，油门的增加和减小就会使飞机抬头或低头，因此需要升降舵的修正。然而，在波音777上面，电传飞行系统可以补偿油门的变化，因此不需要飞行员的输入。飞机还有“速度趋势”矢量指示，它由一个绿色箭头构成，当速度改变时，箭头向速度带上的实际空速的任意一个方向延伸。箭头柄的长度表示飞机加速的量度，它在空速可能稳定10秒时消失。

自动语音喊话：100、50（跑道头一闪而过）、30、20、10。

在大约离地面25英尺时，机长操纵机头上仰几度，控制下降率，开始飞机拉平，同时油门杆自动收回。（飞机机腹和地面之间的空气对接地起到缓冲作用，这被称为地面效应。）

尽管无线电高度表自动喊出高度，人工接地仍然需要很好的高度判断力，并且机长必须调整好俯视跑道的视角（这就如同在路边停车时，向前看比直接从边上看能更容易地判断距离）。由于偏流的影响，飞机机头偏向跑道中线的右边，在接地前稍微蹬左舵使机头对准跑道。通过略带侧滑来修正侧风使飞机对准跑道，右侧的风稍稍带点右坡度。在接地的一刻，机长的右手在收回的油门杆上，左手在驾驶杆上，判断拉平带住杆，同时使用右侧的副翼保持机翼水平，左脚稍稍蹬舵使飞机对准中线。操纵动作只持续几秒钟，在强侧风中，修正的时机就变得很重要。

英航213在格林尼治标准时间17时55分顺利落地，接地时扰流板自动放出。乘客当然喜欢平稳的落地，但是在雨天或者有风的情况下，出于安全考虑，飞行员必须更加小心谨慎，让机轮扎实地接触潮湿的道面，防止飞机在强侧风的情况下偏出跑道。副驾驶把反推手柄升到开锁位，当机长喊出“全部反推”时，收回油门到全部反推位。在干的跑道道面，甚至是长的湿道面时，通常只使用慢车反推，因为碳刹车极其有效。接地的速度大约是130节。当重量大约是188吨（最大重量208.6吨），设置自动刹车4时，减速也是相当明显的。在接地时，机轮向上卷起一阵烟，自动刹车（通过防滞系统保护）立刻工作使飞机减速。两个飞行员都要警惕可能出现的自动刹车意外解除预位，这将显示为发动机指示与机组警告系统告警。在这种情况下需要人工刹车。

机长柔和地前推驾驶杆使前轮接地，同时用驾驶盘保持机翼水平。在反推的作用下，发动机轰鸣起来，机长使用方向舵保持飞机方向。反推在高速时效果更好，当反推力作用时，飞机减速，同时自动刹车会作出相应调整。在反推和自动刹车的作用下，飞机的速度持续降低。在60节时，副驾驶喊出速度，当机长要求慢车反推时，副驾驶前压反推手柄到慢车反推位。随着速度降低到60节以下，机长使用人工刹车断开自动刹车。推力手柄放置在慢车位，在20节时副驾驶再次喊出速度。在大约10节时，机长的左手放到了转向轮上来操纵飞机，英航213通过“W”出口脱离跑道，管制员要求它在4号左跑道外等待，并保持在塔台频率上。由于4号左跑道也作为落地跑道，波音777必须等到短五边进近的飞机落地后，才能进入停机位（见图11—11）。

波士顿塔台R/T：英航213，在S滑行道穿越4号左跑道。穿越后联系地面121.9。

副驾驶R/T：地面英航213，停机位7A。

波士顿地面R/T：英航213，在K右转，在Z外等待。

大多数大型机场都有带字母或数字编号的滑行道，机组必须按照航图的指示。有时也会有引导车引导飞机到停机位。机长放好减速板手柄，这是着陆后程序的一个动作。副驾驶收回襟翼，在滑行时启动辅助动力装置。关闭着陆灯、频闪灯、气象雷达、应答机和自动刹车。机长喊出着陆后检查单，除了选择机舱门到人工位，确认所有的项目都完成。

靠近Z滑行道时，地面管制员允许飞机继续滑行到停机位。靠近7A停机位时，飞机减速，机头朝向候机楼滑到停机位，地面上从候机楼延伸的一条线表示停机位中线。机长使飞机的前轮对准这条线，副驾驶在广播中要求客舱人员设置机舱门到人工位并交叉检查。在下方发动机指示与机组警告系统上，监控机门检查所有机门从A（自动）转为M（人工），落地后检查确认完成。

停机必须准确到位以便廊桥连接，通常有一些停机位指引系统向机长显示准确的停机位置。停机位指引系统各不相同，但是停机位中线通常以某种方式显示在候机楼前。有一种系统叫作停机方位引导系统，它通过两个绿色的显示器显示停机位中线，当飞机偏离中线时会在左边或右边显示一个红色的条。其根据机型设置，有时停机显示板显示对准的移动标识逐渐靠近另一个标识（parallax aircraft parking aid，PAPA，即视差停机辅助）。有时用放置在停机位、与风挡高度相当的黄黑色相间的条来显示停止。

一个更新的系统叫作飞机停机信息系统（aircraft parking information system，APIS），它可以根据飞机类型来设置程序，并给出清晰的中线和停止指示（见图11—14）。当没有指引系统时，或者停机位远离候机楼时，飞机通过信号员引导到停机位。信号员在白天使用彩色的指挥棒，在晚上使用黄色的发光指挥棒。两个手臂从前方向头部上方移动表示飞机径直向前，挥动一只手臂表示向其方向转弯，在头部上方交叉手臂表示停止（见图11—15）。在有些机场，比如美国的华盛顿，飞机旁有大型的摆渡车运送旅客到候机楼，一次可运100人。

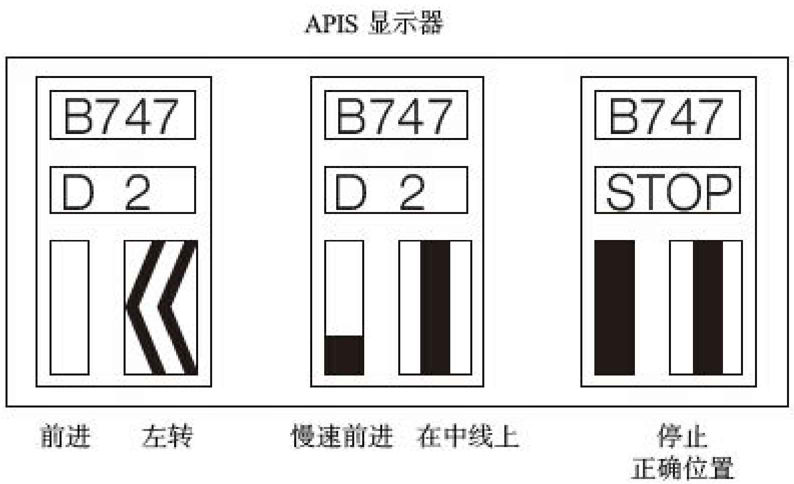


图11—14 APIS飞机靠泊系统

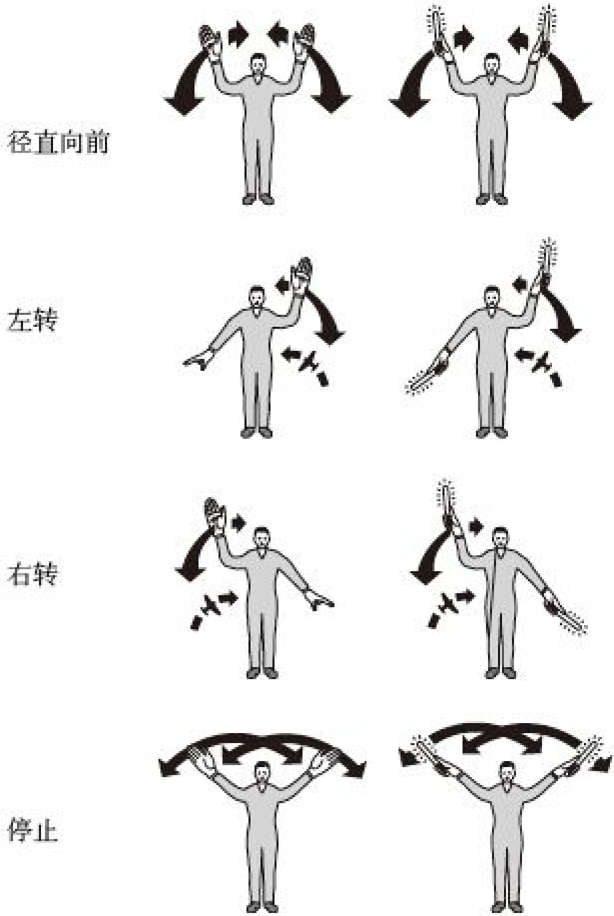


图11—15 信号员的信号

英航213在信号员的帮助下靠近停机位，信号员站在一组高梯子的上面。飞机全停后，设置停留刹车，然后开始关车程序。由地面机务确认挡好前轮轮挡，并确认轮挡时间18时15分（早于计划时间5分钟）。当电力等转为由辅助动力装置提供时，发动机关车，安全带信号熄灭，设备依次关闭。然后，副驾驶读出“关车”检查单：设置停留刹车，关闭燃油控制电门，关闭液压泵和燃油泵。检查状态页面，并在技术记录中记录任何显示的故障和剩下的燃油。完成以上工作后，整理文字材料并提交，折叠放好航图。由于飞机几小时后应该返回伦敦，所以让飞机系统保持运行，飞机留给地面机务维护。如果飞机要停留更长的时间或者过夜，在离开飞机前必须确保安全，完成安全检查单：关闭应急出口灯、建立外部电源，关闭辅助动力装置，大气数据惯性基准组件关闭，电瓶电门和空调组件关闭。通常要为工程师留下外部电源，方便他们完成维护检查。

轮挡放置好30分钟后，机组任务完成。现在是波士顿时间下午1点45分，伦敦时间下午6点45分。明天机组将连夜将飞机往东飞回伦敦。

当他们休息时，成千上万的机组成员正24小时不停地把数不清的飞机飞到世界各个角落。飞机只是偶尔会休息一下！

[1] 冰岛西南部的城市，在首都雷克雅未克西南35千米。——译者注

[2] 科克城是爱尔兰南部城市，大西洋的入口，人口约13万。——译者注

[3] 北纬52度、西经30度航路点。——译者注

[4] 商用飞机的发动机在设计时满足当大气温度20℃左右时，仍能够保持设计的最大推力。而随着温度升高，空气密度下降，发动机的最大推力会减小。——译者注

[5] Vref速度是特定襟翼设置、特定飞机重量情况下失速速度的1.3倍对应的速度。飞行员在着陆下滑时，保持Vref速度再加上对风的修正值。——译者注

[6] 自动刹车在中断起飞位，起飞过程中下列情况发生时，系统会自动提供最大刹车：推力手柄收至慢车或地速大于85海里。减速板在反推手柄拉起时会自动升起。——译者注

[7] R/T代表receiver/transmitter，接收/发射。无线电通话专用词。

[8] 发动机防冰开关分为“关”、“自动”、“开”3个位置。在自动位，空中存在结冰条件时，防冰自动打开。——译者注

[9] 为使双发飞机在荒无人烟地区上空飞行时，达到与三四发飞机相同的安全能力，引进航路备降机场概念。等时点即从此点至两个备降机场的单发飞行时间相同，到达此点之前去一个备降机场，飞过此点去另一个备降机场。——译者注

[10] 圣劳伦斯和新斯科舍是加拿大两个省的名字。——译者注

[11] 1°F＝17.22℃。——译者注

[12] 1944年12月7日通过了《国际民用航空公约》，因其在美国芝加哥签署，又称《芝加哥公约》。我国于1974年2月15日承认该公约，并参加国际民航组织。——译者注

[13] 在阿拉斯加州的中南部，是北美洲最高的山峰，海拔6 197.6米。——译者注

[14] 波音777飞机复飞时，第一次按下起飞/复飞电门，发动机前加推力至保持2 000英尺/分钟的上升率。第二次按下起飞/复飞电门，发动机加至最大复飞推力。——译者注

附 录 1

波音 777 相关参数

波音777-200ER、200LR、300、300ER系列

翼展：200ER与300系列的翼展为199.9英尺（60.9米）；200LR与300ER系列的翼展为212.6英尺（64.8米）
长度：200ER与200LR系列长为209.1英尺（63.7米）；300与300ER系列长为242.5英尺（73.9米）
高度：200ER与300系列高60.7英尺（18.5米）；200LR与300ER系列高60.9英尺（18.57米）

燃油容量（标准）：
200ER与300系列：171 170升（37 650英加仑或45 220美制加仑）
200LR系列：195 285升（42 960英加仑或51 760美制加仑）
300ER系列：181 200升（39 860英加仑或48 020美制加仑）



波音777

最大起飞重量：
200ER系列：297 600kg（656 000磅）
300系列：299 370kg（660 000磅）
200LR与300ER：340 200kg（1 750 000磅）

最大座位数：
200ER与200LR系列：440
300与300ER系列：550

设计最大航程：
200ER系列：7 770海里（14 400千米）
200LR系列：8 850海里（16 405千米）
300系列：5 980海里（11 080千米）
300ER系列：7 190海里（13 330千米）

最大巡航高度：200ER与300系列为43 100英尺

正常巡航速度：200ER、200LR、300与300ER系列，马赫数为0.84

发动机：
200ER系列：通用电气公司的2×93 700磅的GE90–94B型号的发动机

或普·惠公司的2×84 000–90 100磅的PW4084/4090型号的发动机

或罗罗公司的2×86 500–93 250磅的遄达884/895型号的发动机

200LR系列：通用电气公司的2×110 00磅的GE90–110B1型号的发动机

300系列：普·惠公司的2×90 000–98 000磅的PW4090/4098型号的发动机

或罗罗公司的2×90 000磅的遄达892型号的发动机

300ER系列：通用电气公司的2×115 000 磅的GE90–115B型号的发动机

附录 2
飞行专用术语

AC（alternating current）交流电

ACARS（aircraft communications and reporting system）飞机通信寻址与报告系统

ACEs（actuator control electronics）作动筒控制电子设备

ADF（automatic direction finder）自动定向仪

ADIRU（air data inertial reference unit）大气数据惯性基准组件

ADS（automatic dependent surveillance）自动相关监视

AFDS（autopilot/flight director system）自动驾驶仪与飞行指引系统

AH（artificial horizon）人工地平仪

AIMS（aircraft information management system）飞机信息管理系统

ALT（altimeter）高度表

AM（amplitude modulated）调幅

APIS（aircraft parking information system）飞机停机信息系统

APU（auxiliary power unit）辅助动力装置

ASI（airspeed indicator）空速指示器

ATA（actual time of arrival）实际到达时间

ATC（air traffic control）空中交通管制

ATCC（air traffic control centre）空中交通管制中心

ATIS（automatic terminal information service）自动终端情报服务

ATM（air traffic management）空中交通管理

ATPL（airline transport pilot’s licence）航空运输飞行员执照

ATR（airline transport rating）航空运输等级

AUW（all-up weight）空中总重量

C（compass）罗盘

CAA（civil aviation authority）英国民用航空局

CAT（clear air turbulence）晴空乱流

CAVOK（ceiling and visibility OK）晴空万里

Cb（cumulonimbus cloud）积雨云

CDU（control / display unit）控制/显示组件
C of G（centre of gravity）重心
CPL（commercial pilot's licence）商业飞行员执照
CRT（cathode-ray tube）阴极射线管
CTA（control area）管制区
CTZ（control zone）管制区
CVR（cockpit voice recorder）驾驶舱语音记录器
DME（distance measuring equipment）测距仪
EAI（engine anti-icing）发动机防冰指示
EFIS（electronic flight instrument system）电子飞行仪表系统
EGPWS（enhanced ground proximity warning system）增强型近地警告系统
EGT（exhaust gas temperature）排气温度
EICAS（engine indicating and crew alerting system）发动机指示与机组警告系统
EPR（engine pressure ratio）发动机增压比
ETA（estimated time of arrival）预达时间
ETD（estimated time of departure）预计离场时间
ETOPS（extended range twin operations）双发延程飞行
ETP（equal time point）等时点
FANS（future air navigation system）未来空中导航系统
FAA（federal aviation administration）美国联邦航空局
FIR（flight information region）飞行情报区
FL（flight level）飞行高度层
FMA（flight mode annunciator）飞行方式显示器
FMS（flight management system）飞行管理系统
FMC（flight management computer）飞行管理计算机
F/O（first officer）副驾驶
FPV（flight path vector）飞行航迹引导
GCA（ground control approach）地面管制进近
GMT（Greenwich Mean Time）格林尼治标准时间
GPS（global positioning system）卫星导航全球定位系统
GPU（ground power unit）地面电源车
G/S（glide slope）下滑台
HP（high pressure）高压
HUD（head-up display）平视显示器
IAS（indicated airspeed）指示空速

IAT（international atomic time）国际原子时
IATA（international air transport association）国际航空运输协会
ICAO（international civil aviation organization）国际民航组织
IFR（instrument flight rules）仪表飞行规则
ILS（instrument landing system）仪表着陆系统
IM（inner marker）内指点标
IR（instrument rating）仪表等级
IRU（inertial reference unit）惯性基准组件
IRS（inertial reference system）惯性基准系统
INS（inertial navigation system）惯性导航系统
ISA（international standard atmosphere）国际标准大气
ITCZ（inter-tropical convergence zone）热带辐合区
LCD（liquid crystal display）液晶显示器
LMT（local mean time）地方平均时
LNAV（lateral navigation）水平导航
LOC（localiser）航向台
LOM（locator outer maker）外指点标台
LP（low pressure）低压
LSB（lower sideband）下边带
MAC（mean aerodynamic chord）平均空气动力弦
MCDU（master control/display unit）主控制/显示组件
MEL（minimum equipment list）最低设备清单
MFD（multi-function display）多功能显示器
MLS（microwave landing system）微波着陆系统
MNPS（minimum navigation performance sector）最低导航性能区域
MSA（minimum safe altitude）最低安全高度
MSL（mean sea level）平均海平面
ND（navigation display）导航显示器
NDB（non-directional beacon）无方向性信标
Ns（nimbostratus）雨层云
OAT（outside air temperature）外界大气温度
OCA（ocean control area）海洋管制区
OM（outer marker）外指点标
OSV（ocean station vessel）海洋船站
PAPA（parallax aircraft parking aid）视差停机辅助
PAPI（precision approach position indicator）精密进近航道指示灯

PAR（precision approach radar）精密进近雷达
PCU（power control unit）动力控制组件
PFC（primary flight computer）主飞行计算机
PFCS（primary flight control system）主飞行控制系统
PFD（primary flying display）主飞行显示
PNdB（perceived noise decibels）可感噪音分贝
PPL（private pilot's licence）私人飞行员执照
PVD（para-visual display）辅助目视显示器
QFE（airport elevation altimeter pressure setting）机场标高气压设定值
QNH（mean sea level altimeter pressure setting）平均海平面气压设定值
QRH（quick response handbook）快速检查手册
RA（radio altimeter）无线电高度表
RAT（ram air turbine）冲压空气涡轮
RMI（radio magnetic indicator）无线电磁指示器
RNAV（area navigation）区域导航
rpm（revolutions per minute）发动机转速
R/T（radiotelephony）无线电通话
RVR（runway visual range）跑道视程
RVSM（reduced vertical separation minimum）缩小垂直间隔
satcom（satellite communication）卫星通信
satnav（satellite navigation）卫星导航
S/F/O（senior first officer）高级副驾驶
SID（standard instrument departure）标准仪表离场
SSA（sector safe altitude）扇区安全高度
SSB（single sideband）单边带
SSR（secondary surveillance radar）二次监视雷达
S/SI（slip/skid indicator）侧滑指示器
STAR（standard terminal arrival route）标准终端进场航路
TA（transition altitude）过渡高度
TAC（thrust asymmetry compensation）推力不对称补偿
TAS（true airspeed）真空速
TCAS（traffic collision and avoidance system）交通冲突与防撞系统
TL（transition level）过渡高度层
TMA（terminal maneuvering area）终端航站活动空域
TO/GA（take-off/go around switches）起飞/复飞开关

TRSB（time reference scanning beam）时基扫描波束
TRU（transformer rectifier unit）变压整流装置
UIR（upper flight information region）高空飞行情报区
USB（upper sideband）上边带
UTA（upper control area）高空管制区
UTC（universal time co-ordinated）世界协调时
V1（go or no-go decision speed）起飞决断速度
V2（take-off safety speed）安全爬升速度
VR（rotation speed）抬轮速度
VDL（VHF data link）甚高频数据链
VMCG（minimum speed for control on the ground）地面最小控制速度
VNAV（vertical navigation）垂直导航
VOR（very high frequency omni-directional radio range）甚高频全向信标
Vref（reference landing speed）着陆参考速度
VSI（vertical speed indicator）垂直速度指示器
W/V（wind velocity）风矢量
ZFW（zero fuel weight）无燃油重量

湛庐文化 Cheers Publishing a mindstyle business 与思想有关

湛庐，与思想有关……

如何阅读商业图书

商业图书与其他类型的图书，由于阅读目的和方式的不同，因此有其特定的阅读原则和阅读方法，先从一本书开始尝试，再熟练应用。

阅读原则1 二八原则

对商业图书来说，80%的精华价值可能仅占20%的页码。要根据自己的阅读能力，进行阅读时间的分配。

阅读原则2 集中优势精力原则

在一个特定的时间段内，集中突破20%的精华内容。也可以在一个时间段内，集中攻克一个主题的阅读。

阅读原则3 递进原则

高效率的阅读并不一定要按照页码顺序展开，可以挑选自己感兴趣的部分阅读，再从兴趣点扩展到其他部分。阅读商业图书切忌贪多，从一个小主题开始，先培养自己的阅读能力，了解文字风格、观点阐述以及案例描述的方法，目的在于对方法的掌握，这才是最重要的。

阅读原则4 好为人师原则

在朋友圈中主导、控制话题，引导话题向自己设计的方向去发展，可以让读书收获更加扎实、实用、有效。

阅读方法与阅读习惯的养成

（1）回想。阅读商业图书常常不会一口气读完，第二次拿起书时，至少用15分钟回想上次阅读的内容，不要翻看，实在想不起来再翻看。严格训练自己，一定要回想，坚持50次，会逐渐养成习惯。

（2）做笔记。不要试图让笔记具有很强的逻辑性和系统性，不需要有深刻的见解和思想，只要是文字，就是对大脑的锻炼。在空白处多写多画，随笔、符号、涂色、书签、便签、折页，甚至拆书都可以。

（3）读后感和PPT。坚持写读后感可以大幅度提高阅读能力，做PPT可以提高逻辑分析能力。从写读后感开始，写上5篇以后，再尝试做PPT。连续做上5个PPT，再重复写三次读后感。如此坚持，阅读能力将会大幅度提高。

（4）思想的超越。要养成上述阅读习惯，通常需要6个月的严格训练，至少完成4本书的阅读。你会慢慢发现，自己的思想开始跳脱出来，开始有了超越作者的感觉。比拟作者、超越作者、试图凌驾于作者之上思考问题，是阅读能力提高的必然结果。

好的方法其实很简单，难就难在执行。需要毅力、执著、长期的坚持，从而养成习惯。用心学习，就会得到心的改变、思想的改变。阅读，与思想有关。

［特别感谢：营销及销售行为专家 孙路弘 智慧支持！］

我们出版的所有图书，封底和前勒口都有“湛庐文化”的标志

湛庐文化 Cheers Publishing a mindstyle business 与思想有关

并归于两个品牌

财富汇 心视界

找“小红帽”



为了便于读者在浩如烟海的书架陈列中清楚地找到湛庐，我们在每本图书的封面左上角，以及书脊上部 47mm 处，以红色作为标记——称之为**“小红帽”**。同时，封面左上角标记**“湛庐文化 Slogan”**，书脊上标记**“湛庐文化 Logo”**，且下方标注图书所属品牌。

湛庐文化主力打造两个品牌：**财富汇**，致力于为商界人士提供国内外优秀的经济管理类图书；**心视界**，旨在通过心理学大师、心灵导师的专业指导为读者提供改善生活和心境的通路。

阅读的最大成本

读者在选购图书的时候，往往把成本支出的焦点放在书价上，其实不然。

时间才是读者付出的最大阅读成本。

阅读的时间成本=选择花费的时间+阅读花费的时间+误读浪费的时间

湛庐希望成为一个“与思想有关”的组织，成为中国与世界思想交汇的聚集地。通过我们的工作和努力，潜移默化地改变中国人、商业组织的思维方式，与世界先进的理念接轨，帮助国内的企业和经理人，融入世界，这是我们的使命和价值。

我们知道，这项工作就像跑马拉松，是极其漫长和艰苦的。但是我们有决心和毅力去不断推动，在朝着我们目标前进的道路上，所有人都是同行者和推动者。希望更多的专家、学者、读者一起来加入我们的队伍，在当下改变未来。

湛庐文化 2008-2013 年获奖书目

《大数据时代》
国家图书馆“第九届文津奖”十本获奖图书之一
CCTV“2013 中国好书”25 本获奖图书之一
《光明日报》2013 年度《光明书榜》入选图书
《第一财经日报》2013 年第一财经金融价值榜“推荐财经图书奖”
2013 年度和讯华文财经图书大奖
2013 亚马逊年度图书排行榜经济管理类图书榜首
《中国企业家》年度好书经管类 TOP10
《创业家》“5 年来最值得创业者读的 10 本书”
《商学院》“2013 经理人阅读趣味年报 · 科技和社会发展趋势类最受关注图书”
《中国新闻出版报》2013 年度好书 20 本之一
2013 百道网 · 中国好书榜 · 财经类 TOP100 榜首
2013 蓝狮子 · 腾讯文学十大最佳商业图书和最受欢迎的数字阅读出版物
2013京东经管图书年度畅销榜上榜图书，综合排名第一，经济类榜榜首

《爱哭鬼小隼》
国家图书馆“第九届文津奖”十本获奖图书之一
《新京报》“2013 年度童书”
《中国教育报》“2013 年度教师推荐的 10 大童书”
新阅读研究所“2013年度最佳童书”

《牛奶可乐经济学》
国家图书馆“第四届文津奖”十本获奖图书之一
搜狐、《第一财经日报》2008年十本最佳商业图书

《影响力》（经典版）
《商学院》“2013 经理人阅读趣味年报 · 心理学和行为科学类最受关注图书”
2013 亚马逊年度图书分类榜心理励志图书第八名
《财富》鼎力推荐的75本商业必读书之一

《影响力》（教材版）
《创业家》“5年来最值得创业者读的10本书”

《大而不倒》
《金融时报》· 高盛 2010 年度最佳商业图书入选作品
美国《外交政策》杂志评选的全球思想家正在阅读的 20 本书之一
蓝狮子·新浪2010年度十大最佳商业图书，《智囊悦读》2010年度十大最具价值经管图书

《第一大亨》
普利策传记奖，美国国家图书奖
2013 中国好书榜 · 财经类 TOP100

《卡普新生儿安抚法》（最快乐的宝宝 1·0~1 岁）
2013新浪“养育有道”年度论坛养育类图书推荐奖

《正能量》
《新智囊》2012年经管类十大图书，京东2012好书榜年度新书

《认知盈余》
《商学院》“2013 经理人阅读趣味年报 · 科技和社会发展趋势类最受关注图书”
2011年度和讯华文财经图书大奖

《神话的力量》
《心理月刊》2011年度最佳图书奖

《真实的幸福》
《职场》2010 年度最具阅读价值的 10 本职场书籍

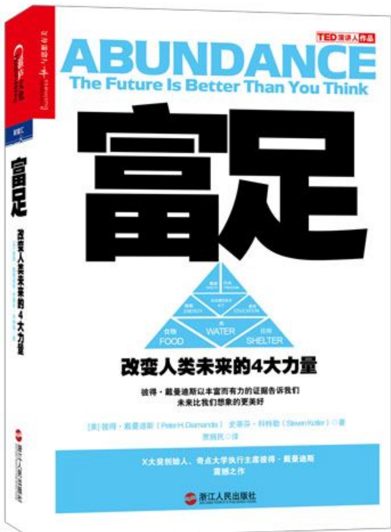




延伸阅读

《富足》

◎ X大奖创始人、奇点大学执行主席彼得·戴曼迪斯震撼之作。
◎ 李嘉诚案头最显眼的重磅著作，政府、行业和企业家通向未来的战略路线图。
◎ 海尔集团董事局主席、首席执行官张瑞敏；微软全球资深副总裁，微软亚太研发集团主席张亚勤；《罗辑思维》主讲人罗振宇鼎力推荐。

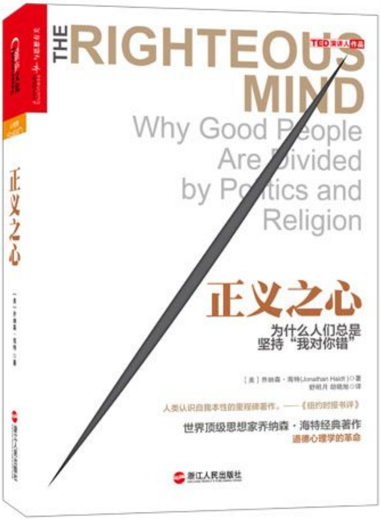


扫码直达本书购买链接

本书购买链接：http://t.cn/RzZhWE5

《正义之心》

◎ 著名心理学家、坦普尔顿积极心理学奖获得者、畅销书《象与骑象人》作者、TED演讲人乔纳森·海特最新力作。
◎ 汇集道德心理学、社会心理学、神经系统学、遗传学、发展心理学和认知科学这些领域中最新的科学研究与成果。
◎ 任志强、清华大学经管学院领导力与组织管理系教授钱小军倾情推荐。

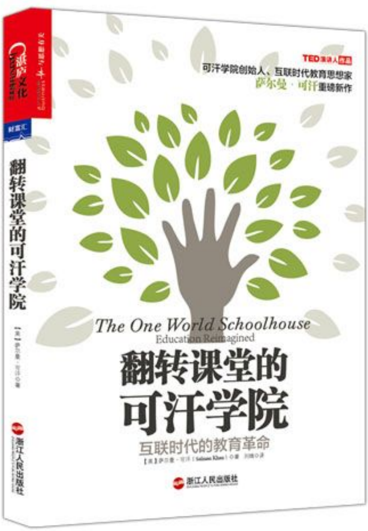


扫码直达本书购买链接

本书购买链接：http://t.cn/RzZhHlN

《翻转课堂的可汗学院》

◎ 全球100大最具影响力人物、互联网时代的教育改革家萨尔曼·可汗实践之作。
◎ 美国前副总统阿尔·戈尔、微软公司创始人比尔·盖茨联袂推荐。
◎ 未来的教育，由学习者自己主宰。



扫码直达本书购买链接

本书购买链接：http://t.cn/RzZhRjh

《超级合作者》

◎ 新时代的达尔文、明星科学家马丁·诺瓦克24年前沿研究之集合，创立第3进化原则，破解人类合作之谜，洞悉人类社会与行为。
◎ 我们人类是超级合作者，只有通力合作才能拯救我们共同的家园。



扫码直达本书购买链接

本书购买链接：http://t.cn/RzZhebT